



FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académica Profesional de
Ingeniería Eléctrica

**“ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES DEL
SISTEMA ELÉCTRICO EN 50 kV, ENTRE LA SS.EE. SMELTER Y SS. EE.
CINCO MANANTIALES, CERRO DE PASCO- MARZO DEL 2015”**

TESIS
Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Presentado por:
Bach. Alfredo Huamán Medrano

HUANCAYO-PERÚ
2016

DEDICATORIA

A mis seres queridos (Padres, Hermanos, Familiares y Amigos), quienes aportaron para que este pequeño trabajo se culmine y sea de mucho beneficio para los demás.

AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mi agradecimiento a los docentes de la Universidad Continental por el apoyo constante en el desarrollo del presente trabajo de investigación, y en particular a mi asesor el Ingeniero César Alfredo Chilet León por su constante apoyo incondicional y la perseverancia en conseguir un proyecto de buen nivel.

Mi agradecimiento al Ingeniero Carlos Roncal Madge gerente general, de la Empresa CONSORCIO MASTER SAC, por los aportes y su experiencia en este tema.

A Cesar Iván Aguirre Lazo técnico de mantenimiento eléctrico, por la información facilitada relacionada a los datos de la empresa SOCIEDAD MINERA EL BROCAL S.A.

Quisiera también expresar mi agradecimiento al personal de mantenimiento eléctrico de la COMPAÑÍA MINERA MILPO – EL Porvenir, por permitirme utilizar información relacionada a la tesis, aplicaciones utilizadas dentro de sus instalaciones y por su apoyo directo o indirecto en la finalización de este trabajo de investigación.

ASESOR

Ing. CÉSAR ALFREDO CHILET LEÓN

SUMARIO

El presente trabajo de Tesis, tiene por finalidad dar solución a un problema existente en la línea eléctrica de 50 kV, que continuamente se ve afectada por las descargas atmosféricas, para ello tomaremos en cuenta las características eléctricas de la instalación, los 4 500 m.s.n.m. donde se encuentra y el grado de incidencia de las descargas atmosféricas. El objetivo es determinar la(s) protección(es) más óptima(s) contra las sobretensiones que se pudieran presentar en la instalación.

Los efectos de las sobretensiones, afectan en mayor grado a las líneas eléctricas aéreas que están sometidas durante su operación a solicitaciones eléctricas de origen interno y externo que pueden dañar el aislamiento de la instalación. No se puede predecir con exactitud las características de estas sobretensiones atmosféricas, pero si se pueden estimar los valores a partir de normas y registros históricos.

En esta investigación se alcanza el análisis acerca del comportamiento de la descarga atmosférica con respecto a la línea eléctrica, su efecto en las sobretensiones inducidas y por ende como repercuten en el cálculo de protección de las líneas de Alta Tensión.

Es de vital importancia para este análisis, la aplicación de los descargadores de sobretensiones de óxido metálico, comúnmente conocidos como pararrayos, para que el

sistema de protección contra sobretensiones funcione y brinde un sistema eléctrico confiable y seguro. A continuación se detalla el resumen del contenido por cada capítulo.

En el Capítulo I, de esta tesis se hace referencia al planteamiento del problema de la línea eléctrica de 50 kV a 4 500 m.s.n.m., la importancia y la justificación del desarrollo para la empresa el Brocal, quien es propietaria de la línea eléctrica. Se hace de conocimiento sobre la situación actual del sistema eléctrico de la Sociedad Minera el Brocal.

En el Capítulo II, se presenta el marco teórico de la tesis, los diversos estudios relacionados a este tema como parte de los antecedentes. Se aborda todos los conceptos relacionados a la naturaleza y clasificación de las sobretensiones que se originan en las redes eléctricas.

En el Capítulo III, se aborda todos los conceptos relacionados a sobretensiones de origen externo (descargas atmosféricas), desde su origen, clasificación y las características de las descargas en las redes eléctricas. Para el presente estudio, la cantidad de descargas atmosféricas se determinó de acuerdo al mapa isoceraúnico del Perú.

En el Capítulo IV, se realiza el análisis de los diversos tipos de protección que se emplean en este tipo de sobretensiones las cuales son, el apantallamiento de cables, el empleo de los descargadores de sobretensiones, instalación de puestas a tierra y buen nivel de

aislamiento. Todos estos parámetros de protección contra sobretensiones se realizaron en la instalación que opera actualmente.

En el Capítulo V, se emplea el método IEEE 1410 -2010, para realizar la memoria de cálculo de las descargas atmosféricas en la línea eléctrica del presente estudio. Los cálculos están basados en las normas de la IEEE, IEC. Estos cálculos son para determinar, la forma del impulso tipo rayo, cálculo de la probabilidad de corriente pico, sobretensiones inducidas, tasa de flameos por descargas directas, y la estimación de la salida de la red eléctrica con cable de guarda.

En el Capítulo VI, se realiza el modelamiento de la línea con el software de simulación (PSCAD), haciendo uso de los datos obtenidos en el Capítulo V, parámetros de la red existente, datos de fabricantes de los diversos equipos y componentes utilizados en la red existentes y los equipos por implementarse.

Y como parte final, se realiza las conclusiones y recomendaciones de la presente tesis, con lo que se espera reducir al mínimo, las interrupciones del servicio eléctrico por sobretensiones debido a descargas atmosféricas.

ABSTRACT

This thesis work, aims to solve a problem in an existing 50 kV power line, which continually affected by lightning, for it will take into account the electrical characteristics of the installation, 4 500 m.s.n.m. where it is and the degree of incidence of lightning. The goal is to determine (s) protection (s) optimally (s) against surges that may arise in the installation.

The effects of the surge, affecting most to the overhead power lines that are subjected during operation to electrical stresses of internal and external origin which could damage the insulation installation. You can not accurately predict the characteristics of these atmospheric surges, but if values can be estimated from historical records and rules.

In this research the analysis of the behavior of lightning with respect to the power line, its effect on the induced voltages and thus affect the calculation as the protection of high voltage lines is reached.

It is vitally important for this analysis, the application of surge arresters metal oxide, commonly known as lightning rods, so that the surge protection system works and provide a reliable and safe electricity system. The following table shows the summary of contents for each chapter.

In Chapter I of this thesis referring to approach the problem of 50 kV power line to 4 500 m.s.n.m., the importance and justification of development for the company Brocal, who owns the power line. It is made of knowledge on the current status of the electrical system of the Sociedad Minera Brocal.

In Chapter II, the theoretical framework of the thesis is presented, the various studies related to this topic as part of the background. All concepts related to the nature and classification of surges that originate in power networks is addressed.

In Chapter III, all concepts related to overvoltage of external origin (lightning), since its origin, classification and characteristics of discharges in electric networks is addressed. For the present study, the amount of atmospheric discharges was determined according to isoceraúnico map of Peru.

In Chapter IV, the analysis of various types of protection that are used in these types of surges which are shielding cables, the use of surge arresters, grounding installation and good level of insulation is done. All these parameters were performed surge protection in the installation currently operates.

In Chapter V, the IEEE 1410 -2010 method is used to perform memory calculation atmospheric discharges in power line of this study. The calculations are based on IEEE standards, IEC. These calculations are to determine the shape of the lightning impulse, calculating the probability of peak current, induced surges, flashover rate by direct downloads, and estimating the output of the mains wire.

In Chapter VI, modeling the line with simulation software (PSCAD) is performed, using data from Chapter V, parameters of the existing network, data equipment manufacturers and various components used in the existing network and equipment to be implemented.

And as the final part, the conclusions and recommendations of this thesis is done, which is expected to minimize the power outages by surges due to lightning.

INDICE

CARATULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ASESOR	iv
SUMARIO	v
ABSTRACT	viii
LISTA DE TABLAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvi
INTRODUCCIÓN	xviii
 CAPITULO I	
 EL PROBLEMA	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. OBJETIVOS	20
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	20
1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	21
1.3. HIPÓTESIS	21
1.3.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL	21
1.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	22
1.4. VARIABLES, OPERACIONALIZACIÓN	23
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	25
1.6. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	26
1.6.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	27

1.7.	SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SOCIEDAD MINERA EL BROCAL	28
1.7.1.	PLANO DE UBICACIÓN DE LA LINEA EXISTENTE.....	30

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES.....	32
2.1.1.	INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN.....	34
2.2.	SOBRETENSIONES	36
2.2.1.	NATURALEZA Y CLASIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES	36

CAPÍTULO III

ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1.	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	45
3.1.1.	CARGA ELÉCTRICA EN LAS NUBES	46
3.1.2.	EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA ELÉCTRICA	47
3.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA ELÉCTRICA	49
3.2.1.	CURVAS TÍPICAS DEL PORCENTAJE DE RAYOS EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DE DESCARGA	49
3.3.	MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	51
3.4.	NIVEL CERAÚNICO DE LA ZONA DE ESTUDIO	51

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE PROTECCIÓN

4.1.	APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS.....	54
4.1.1.	DESCARGA ATMOSFÉRICA SOBRE EL CABLE DE GUARDA A LO LARGO DEL VANO Y SOBRE LA ESTRUCTURA	57
4.1.2.	ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO	58
4.2.	SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE PARARRAYOS	61
4.2.1.	CONCEPTOS BÁSICOS.....	63
4.3.	NORMAS CONSIDERADAS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	77
4.3.1.	SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	78

4.4.	ANÁLISIS DEL NIVEL DE AISLAMIENTO	80
4.4.1.	CONDICIONES AMBIENTALES.....	80

CAPÍTULO V

MEMORIA DE CÁLCULO - IEEE 1410

5.1.	FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE DESCARGA.....	86
5.2.	CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROBABILIDAD DE CORRIENTE PICO $P(I)$	88
5.3.	CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE LA CORRIENTE PICO ($P(I > I_0)$).....	89
5.4.	METODOLOGÍA SEGÚN VOISLAV PARA EL CÁLCULO DE SOBRETENSIÓN INDUCIDA DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	91
5.5.	CÁLCULO DE TASA DE FLAMEOS POR DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN LA IEEE 1410.....	95
5.5.1.	DENSIDAD DE RAYOS POR km ² SEGÚN IEEE 1410	95
5.5.2.	DENSIDAD DE RAYOS POR km/Año SEGÚN IEEE 1410.....	96
5.5.3.	APANTALLAMIENTO NATURAL SEGÚN IEEE 1410	97
5.5.4.	CÁLCULO DE TASA DE FLAMEOS POR DESCARGAS INDIRECTAS SEGÚN LA IEEE 1410.....	98
5.6.	ESTIMACIÓN DE SALIDA A LA IMPLEMENTACIÓN DE CABLE DE GUARDA	102
5.6.1.	SOMBRA ELÉCTRICA	102
5.6.2.	CÁLCULO DE DESCARGAS DIRECTAS A LA LÍNEA CON CABLE DE GUARDA.....	105

CAPÍTULO VI

MODELAMIENTO Y RESULTADOS DE LA LÍNEA DE 50 KV

6.1.	SOFTWARE MATRIX EMTCD	106
6.2.	SOFTWARE INTERFAZ PSCAD	106
6.3.	REPRESENTACIÓN DE LA LÍNEA AÉREA EN EL PSCAD.....	108
6.3.1.	REPRESENTACIÓN DE LA LÍNEA	108
6.3.2.	IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA DE LA LÍNEA	109

6.4.	CORRIENTE DEL RAYO	109
6.5.	PARARRAYOS O DESCARGADORES DE TENSIÓN	111
6.5.1.	INFORMACIÓN REQUERIDA PARA SIMULAR AL DESCARGADOR.....	112
6.6.	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	115
6.7.	MODELOS DE SIMULACIÓN UTILIZADOS EN EL PSCAD	117
6.8.	ESCENARIOS CONSIDERADOS PARA LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS ...	118
6.8.1.	RESULTADOS DE LA INCIDENCIA DEL RAYO EN EL CONDUCTOR.....	118
6.9.	CUADRO COMPARATIVO.....	122
6.10.	CARACTERÍSTICAS DEL PARARRAYO A INSTALARSE.....	122
	CONCLUSIONES	124
	RECOMENDACIONES	126
	ANEXOS	128
	FOTOGRAFIAS	142
	BIBLIOGRAFIA	146

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Definición conceptual y operacional de la variable	23
Tabla 2: Operacionalización de la variable independiente	24
Tabla 3: Operacionalización de la variable dependiente.....	24
Tabla 4 Generación, compra y consumo de energía en SMEB.....	30
Tabla 5: Niveles Isoceráunicos en el Perú.	52
Tabla 6, Sobre tensiones temporales significativas.....	65
Tabla 7: Clasificación del pararrayos de OM, sin explosores según In de descarga.....	69
Tabla 8: Tensiones residuales para pararrayos de 20 y 10 kA en p.u. de la tensión asignada.....	72
Tabla 9. Valores típicos de impedancia característica.	75
Tabla 10, Parámetros de la prueba de descarga de línea.	76
Tabla 11 Niveles de Contaminación según Norma IEC 815.....	81
Tabla 12: Cuadro de distancia de fuga, en base al nivel de contaminación.	82
Tabla 13: Parámetros de la primera descarga con distribución logarítmica Normal.	87
Tabla 14: Valores estándares de CFO, para diversos componentes.....	99
Tabla 15: Valores estándares de CFO, corregido por criterio atmosférico.	100
Tabla 16: Cuadro de la impedancia característica de la línea de 50 kV.....	109
Tabla 17: Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 50 kV.	114
Tabla 18: Cuadro comparativo de producción vs costo total.....	122
Tabla 19: Descripción de las características del pararrayos.....	123

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1: Línea de 50 kV, SS.EE. Carhuamayo - SS.EE. Smelter.	30
Figura N° 2: Línea 50 kV, SS.EE. Smelter.....	31
Figura N° 3: Factor de falla a tierra (k) en función de $X0/X1$ y $R1/X1 = Rf = 0$	38
Figura N° 4: Modelo Pi matemático de una línea de transmisión.	39
Figura N° 5: Forma de onda típica de una sobretensión de frente lento.	42
Figura N° 6: Características de las sobretensiones clasificadas según su origen.....	43
Figura N° 7: Clases, formas de onda y rango de parámetros de voltajes y sobretensiones.	44
Figura N° 8: Evolución de la descarga eléctrica.....	48
Figura N° 9: Curva Típica de rayos en función de la corriente de descarga.....	50
Figura N° 10: Mapa de niveles Isoceraunicos del Perú.	53
Figura N° 11: Aplicación del modelo electrogeometrico a una línea aérea no apantallada.....	55
Figura N° 12: Aplicación del modelo electrogeométrico de una línea aérea apantallada.....	56
Figura N° 13: Descargas atmosféricas en una línea eléctrica.	57
Figura N° 14: Ángulo de apantallamiento.	59
Figura N° 15: Características del pararrayos VS características del sistema.....	63
Figura N° 16: Característica Tensión AC – Tiempo (TOV).....	68
Figura N° 17: Medición al 62 %.....	79
Figura N° 18: Exponente m en función de V_{cw}	83
Figura N° 19: Modelo de torre en 01 empleado en la línea de 50 kV.	85
Figura N° 20: Modelo de torre 02, empleado en la línea de 50 kV.	85
Figura N° 21: Forma de onda de la corriente de Rayo, Standar IEEE 1410.....	86
Figura N° 22: Densidad de probabilidad de corriente pico.....	89
Figura N° 23: Función de la distribución acumulada de la corriente.....	90

Figura N° 24: Distancia de objeto desde la línea de distribución (m).	97
Figura N° 25: Número de flameos de tensiones inducidas versus nivel de aislamiento de la línea de distribución, voltaje de flameo de impulso crítico, CFO en kV.....	101
Figura N° 26: Sombra eléctrica de la línea.	102
Figura N° 27: Representación de la altura efectiva.	104
Figura N° 28: Entorno grafico del PSCAD.	107
Figura N° 29: Modelamiento de impulso tipo rayo –PSCAD	110
Figura N° 30: Forma de onda de la corriente de rayo (10kA) en PSCAD.....	111
Figura N° 31: Modelo del descargador de tension utilizado para la simulación.	111
Figura N° 32: Característica de V-I en p.u. para las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1.	112
Figura N° 33: Modelo de la incidencia del rayo en la línea de 50 kV.	117
Figura N° 34: Modelamiento de la línea de 50 Kv, con implementación de pararrayos.	117
Figura N° 35: Voltaje en la línea a una de Δt de 0,0002 us. (488.95 kV).....	118
Figura N° 36: Voltaje residual del primer pararrayo (100 kV).....	119
Figura N° 37: Comparación entre el voltaje de la línea y la sobretensión por descarga atmosférica.	119
Figura N° 38: Voltaje línea tierra a un Δt de 0,2 us. (1 152 kV).	120
Figura N° 39: Voltaje después del 1er pararrayo. (405 kV).	120
Figura N° 40: comparación de voltaje con y sin pararrayos.	121
Figura N° 41: Sobretensión inducida en la segunda fase (154.7 kV).	121

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y analizar el sistema de protección contra sobretensiones en la línea de 50 kV, de 7 km. aprox. que parte en la SS. EE. Smelter a la subestación SS. EE. Cinco Manantiales, su área de influencia se encuentra a 4 500 m.s.n.m.

Esta línea es protegida por cables de guarda para el apantallamiento contra descargas atmosféricas, este tipo de protecciones han sido insuficientes ante la presencia de las descargas atmosféricas, en el momento de controlar las sobretensiones. Cabe indicar que el equipamiento protegido ha permanecido en operación, no sufriendo daño en su aislamiento.

Bajo estos antecedentes, proponemos la utilización de descargadores de sobretensiones como sistema de protección adicional, asimismo la mejora del sistema de aterramiento. Para dar mayor sustento a lo planteado, simularemos el comportamiento de la protección contra sobretensiones en el software PSCAD.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la ciudad de Huaraucaca – Cerro de Pasco se ubica la línea de transmisión en el nivel de 50 kV el cual se encuentra a una altitud de 4 500 m.s.n.m., y en los últimos meses de diciembre 2014 a febrero 2015, ha sufrido daños producto de las descargas atmosféricas que son muy frecuentes en la zona y las sobretensiones que se origina en el sistema.

Producto de ello han ocurrido interrupciones del suministro eléctrico desde la SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales, que paralizaron el proceso de producción del mineral de Cu, Zn, Pb de las plantas de tratamiento de 7 000 y 2 490 TM/día, más la minería subterránea de Marcapunta Oeste; de la Sociedad Minera El Brocal, provocando pérdidas significativas. La línea eléctrica en mención está protegida por cables de guarda para el apantallamiento contra descargas atmosféricas; estos cables no han sido suficiente para limitar o mitigar las sobretensiones originadas por la incidencia de los rayos. Cabe indicar que el equipamiento protegido ha permanecido en operación, no sufriendo daño

en su aislamiento. Se busca una solución de compromiso en la que los sistemas de energía se diseñen de tal forma que se pueda hacer mínima, la posibilidad de falla destructiva del aparato de energía debida a sobretensiones.

a) Para realizar éste procedimiento intervienen dos pasos:

- El diseño apropiado del sistema de energía para controlar y llevar al mínimo posible la sobretensión.
- La aplicación de dispositivos de protección por sobretensiones. Y el estudio técnico para determinar la cantidad de los equipos a emplearse.

La línea que a continuación se menciona, formará parte del presente estudio.

- Línea de transmisión 50 kV SS. EE. Smelter a SS. EE. Principal (Cinco Manantiales), de 07 km aprox.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y analizar los sistemas de protección empleados para reducir al mínimo los efectos causados por sobretensiones, mediante el empleo de descargadores de sobretensiones, de la línea de transmisión en 50 kV, SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales.

1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Optimizar las protecciones de los equipos contra sobretensiones de origen atmosférico de la línea de transmisión en 50 kV, SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales.

Se empleará software especializado en la simulación de los eventos y el desempeño de la protección contra sobretensiones, de la Línea de transmisión de 50 kV SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales – Cerro de Pasco, en el año 2015.

Analizar la eficiencia del empleo de descargadores de óxido de metal, contra sobretensiones y así conocer el estado real de los equipos de protección; de la línea de transmisión de 50 kV SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales en la ciudad de Huaraucaca, Cerro de Pasco.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. HIPÓTESIS PRINCIPAL

Dado que en la Ciudad de cerro de Pasco comunidad de Huaraucaca; la incidencia de rayos es muy frecuente y debido a ello la calidad del servicio se vean afectados.

Se propone el Estudio de Sobretensiones del sistema eléctrico de 50 kV, mediante el uso de software de simulación, para mejorar el empleo de los descargadores y minimizar los costes de operación, brindar la confiabilidad y seguridad necesaria a los usuarios.

1.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

La aplicación de software durante el Análisis de sobretensiones está relacionada con la limitación de los parámetros eléctricos, de la Línea de transmisión de 50 kV SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales – Cerro de Pasco, en el año 2015.

El Estudio de sobretensiones influye en la eficiencia para el empleo de los descargadores, de la Línea de transmisión de 50 kV SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales – Cerro de Pasco, en el año 2015.

El análisis de sobretensiones residuales influye en la protección y seguridad de los descargadores, de la Línea de transmisión de 50 kV SS. EE. Smelter hasta SS. EE. Cinco Manantiales – Cerro de Pasco, en el año 2015.

1.4. VARIABLES, OPERACIONALIZACIÓN

Se desarrolla la definición conceptual y operacional de las variables que se están utilizando en la investigación.

Variables	Independiente	Dependiente
	Sobretensiones	Descargadores de Línea
Definición conceptual	Está caracterizada por la presencia de una onda de corriente muy elevada y de corta o larga duración.	Reducir las sobretensiones nocivas y mantenerlas alejadas de los componentes de la red de transmisión.
Definición operacional	Es una onda o impulso de tensión que se superpone a la tensión nominal de la red	Dispositivo que limita las sobretensiones transitorias y dispersa las ondas de corriente a la tierra para reducir la fuerza de la sobretensión.

Fuente: Propia

Tabla 1: Definición conceptual y operacional de la variable

Variable Independiente	Sobretensiones	
Dimensiones	Áreas de influencia	Actividades de investigación o tratamiento.
Línea de Transmisión de 50 kV – Cerro de Pasco	<ul style="list-style-type: none"> . Localidad de Huaraucaca-Cerro de Pasco. . Compañías Mineras del Sector de Huaraucaca. 	Estudio de las sobretensiones de origen atmosférico mediante el uso de software de simulación.

Fuente: Propia.

Tabla 2: Operacionalización de la variable independiente

Variable Dependiente	Descargadores de Línea	
Dimensiones	Áreas de influencia	Actividades de investigación o tratamiento.
Línea de Transmisión de 50 kV – Cerro de Pasco	<ul style="list-style-type: none"> . Localidad de Huaraucaca-Cerro de Pasco. . Compañías Mineras del Sector de Huaraucaca. 	Empleo de descargadores de acuerdo al criterio técnico por medio de la simulación con empleo de software PSCAD.

Fuente: Propia.

Tabla 3: Operacionalización de la variable dependiente.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El Brocal realiza sus operaciones en las unidades Mineras de Colquijirca y la planta Concentradora de Huaraucaca, localizadas en el distrito de Tinyahuarco, provincia de Pasco, departamento y región Pasco, Perú.

Debido a las interrupciones del sistema eléctrico, ocurridas en los últimos meses, el proceso de producción ha disminuido, en las plantas de tratamiento de 7 000 y 2 490 TM/día, más la minería subterránea de Marcapunta Oeste.

También ocurrieron daños a las líneas de distribución 10.5 kV de las SS.EE. Principal (Cinco Manantiales) que se conectan a las centrales hidroeléctricas Jupayragra y Rio Blanco.

Por estos motivos, para la empresa El Brocal, es de suma importancia mantener un suministro continuo de energía eléctrica a sus centros operativos y otros lugares donde se desarrollan sus actividades, y del mismo modo cumplir estándares de calidad de acuerdo a Normas internacionales y nacionales (NTCSE); y las desviaciones de éstas son denominadas perturbaciones de la calidad de energía, por ello es necesaria, la implementación de nuevos sistemas que reduzcan o eliminen las salidas intempestivas de

la tensión y sobre picos de corriente debidos a descargas atmosféricas en las líneas de transmisión o en sus alrededores, que provocan daños considerables en los equipos e instalaciones.

Para dominar la protección contra descargas atmosféricas es necesario:

- Conocer el nivel de sobretensiones que pueden existir en la red.
- Utilizar las mejores protecciones cuando sea necesario.
- Escoger el nivel de soporte a las sobretensiones, de los diversos componentes de la red, entre las tensiones de aislamiento que permiten satisfacer las exigencias que se han determinado.

Escoger el nivel de soporte a las sobretensiones, de los diversos componentes de la red, entre las tensiones de aislamiento que permiten satisfacer las exigencias que se han determinado.

1.6. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

El Brocal explota minerales de plata, plomo y zinc en su mina a tajo abierto denominada Tajo Norte y minerales de cobre en su mina subterránea denominada Marcapunta Norte.

El mineral extraído se procesa en una planta de concentración de minerales, con una capacidad de tratamiento de 11 235 TM/día y cuenta con toda la infraestructura asociada como centrales hidroeléctricas, sub estaciones, talleres, almacenes, canchas de relaves, planta de tratamiento de aguas ácidas, viviendas y oficinas administrativas.

1.6.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

1.6.1.1. Ubicación

La Unidad Minera El Brocal, se ubica en los Andes Centrales del Perú a 25 km al norte del Lago Junín en el distrito de Tinyahuarco, provincia y departamento de Pasco, a una altitud promedio de 4 250 m.s.n.m., donde se encuentran las comunidades campesinas de Colquijirca, Smelter y Huaraucaca. Las operaciones mineras se ubican en el distrito de Tinyahuarco, provincia y departamento de Pasco.

1.6.1.2. Geomorfología y Topografía

Morfológicamente, el área de emplazamiento de la línea de 50 kV, se caracteriza por una topografía suave y relativamente horizontal, la cual se conforma por extensas áreas ligeramente onduladas y suaves, las mismas que se extienden constituyendo las Pampas de Junín. En algunas zonas, el relieve es atravesado por cauces de ríos de pendiente poco

pronunciada y algunos picos dispersos, siendo quizá el de mayor importancia el Cerro Marcapunta, que alcanza una altitud de 4 458 m.s.n.m.

1.6.1.3. Clima

El área del Proyecto se caracteriza por tener un clima frío y gélido donde se distinguen dos períodos seco y lluvioso, presentándose la estación de lluvias habitualmente desde octubre hasta abril y la estación seca desde mayo hasta setiembre.

La temperatura promedio mensual multianual varió entre 3.5°C (mínima) a 6.1°C (máxima mensual); mientras que los promedios mensuales multianuales (1996-2008) de la evaporación y humedad relativa fueron de 70.41 y 66.05% respectivamente. La velocidad promedio mensual multianual (1996-2008) osciló entre 1.0 a 1.3 m/s y la dirección predominante del viento fue Sursureste (SSE) en la estación de Huaraucaca.

1.7. SISTEMA ELÉCTRICO DE LA SOCIEDAD MINERA EL BROCAL

El sistema eléctrico de el brocal incrementó su potencia Instalada de 18 MVA en 50/10.5 kV ONAF a 60 MVA en 138/22.9/10.5 kV ONAF, de acuerdo a la demanda de energía de ampliación de operaciones para una capacidad de tratamiento a 18 000 TM/día.

El sistema instalado permite mejorar la continuidad y confiabilidad del servicio eléctrico. Cuenta con un nivel de tensión del sistema interconectado en 138 kV alimentado por las subestaciones de Carhuamayo de propiedad de la Empresa STATKRAFT PERU SA y Paragsha II, a través de las líneas L-1703 y L-1709, en una longitud de 40 km, alimentando la subestación principal denominada Cinco Manantiales en el poblado de Huaraucaca, la cual cuenta con un transformador de 60/30/24 MVA, ONAF¹ en 138/22.9/10.5 kV, con un patio de llaves de protección y control. El sistema también permite suministrar energía a la subestación Oxidos-15 MVA de la empresa administradora Cerro SAC.

Se cuenta también con el sistema eléctrico en 50 kV, línea eléctrica L-6518 desde la derivación denominada Buenavista del sistema eléctrico de la empresa STATKRAFT PERU SA con una longitud de 2.15 km, a las subestaciones denominada Smelter, Marcapunta Oeste y Cinco Manantiales. La distribución a los diferentes procesos de planta y Mina es a través de las líneas eléctricas en 4.16 kV, 10.5 kV, 22.9 kV y subestaciones. Las centrales Hidroeléctricas Jupayragra y Rio Blanco con potencia de 1.5 MW y 1.1 MW, respectivamente, trabajan interconectadas con la subestación Cinco manantiales en el nivel de tensión de 10.5 kV. Dichas centrales hidroeléctricas son consideradas como fuente alterna de energía asumiendo cargas críticas de Mina Norte, Mina Oeste y Planta Concentradora en caso de producirse falla en el SEIN².

¹ (*Oil Natural circulation Air Forced circulation*), Aceite empleado como sistema de refrigeración de los transformadores.

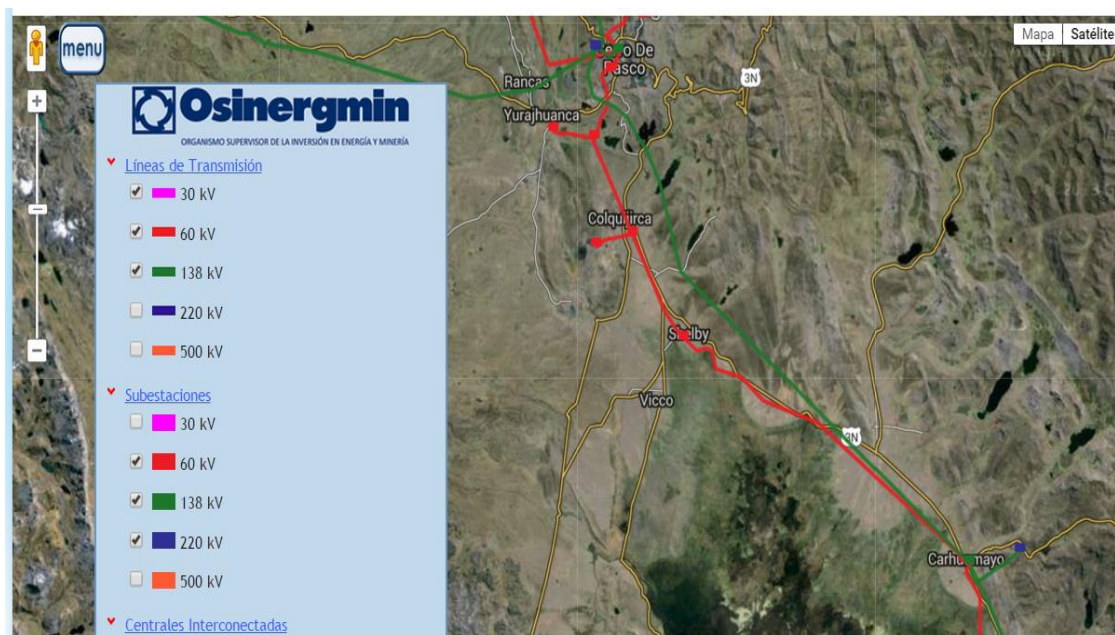
² Es el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional que abastece al 85% de la población peruana conectada.

Indicador	Unidad	2014	2013	2012
Mineral Tratado	TMS	3,445,118.00	3,244,739.00	3,828,256.00
Generación Propia				
C.H. Jupayragra	kWh	10,602,694.00	10,765,417.00	9,456,786.00
C.H. Rio lanco	kWh	8,677,699.00	7,678,605.00	8,166,825.00
Sub Total	kWh	19,280,393.00	18,444,022.00	17,623,611.00
Compra de Energia				
San Gabán	kWh	138,862,513.00	131,316,609.00	130,384,844.00
Huanza	kWh	27,819,050.00		
Sub Total	kWh	166,681,563.00	131,316,609.00	130,384,844.00
Total General	kWh	185,961,956.00	149,760,631.00	148,008,455.00
Factor Consumo General	kWh/TMS	53.98	46.15	38.66
Factor Consumo Planta	kWh/TMS	41.26	32.49	29.74

Fuente: Área de sistemas de generación y transmisión del sistema eléctrico, SMEB

Tabla 4 Generación, compra y consumo de energía en SMEB³.

1.7.1. PLANO DE UBICACIÓN DE LA LINEA EXISTENTE



Fuente: <http://www.osinergminorienta.gob.pe/web/rcc/mapasein>

Figura N° 1: Línea de 50 kV, SS.EE. Carhuamayo - SS.EE. Smelter.

³ Sociedad Minera el Brocal S.A.



Fuente: <http://www.osinergminorienta.gob.pe/web/rcc/mapasein>

Figura N° 2: Línea 50 kV, SS.EE. Smelter.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

La coordinación de aislamiento tiene por objetivo determinar las características del nivel de aislamiento de los equipos con el mejor ajuste técnico - económico, garantizando que el nivel de aislamiento de los equipos soporten las sobretensiones que puedan aparecer como resultado de los disturbios más frecuentes en una instalación eléctrica.

2.1. ANTECEDENTES

Según, Joel Estuardo Zambrano, en su estudio de tesis “**ANÁLISIS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO**”...cuando se da esta condición se sobretensión, normalmente se producen flameos, ya que las sobretensiones que se producen superan el nivel básico de aislamiento. El blindaje se logra de acuerdo a un ángulo determinado, por lo que es de vital importancia la disposición de los hilos de guarda y la de los hilos de línea.

“...El sistema de tierras debe tener un valor bajo de resistencia a tierra para que no se den flameos inversos por onda reflejadas, debido a que la resistencia al pie de la torre toma valores elevados que al producirse una descarga atmosférica y ser conducido a tierra, provoca una diferencia de potencial entre tierra y los hilos de fase capaz de producir una falla...”

Según Eveleen Cuenca, en su tesis **“ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MODELOS DE DESCARGADORES PARA ESTUDIOS DE SOBREVOLTAJES”** indica, ...Tomando en cuenta el comportamiento de los tres modelos simulados, tanto para sobrevoltajes temporales como de maniobra, se establece que el modelo de la resistencia no lineal MOV type 92 se puede utilizar para este tipo de eventos, seleccionando una adecuada característica no lineal V-I; de esta manera los resultados de los sobrevoltajes obtenidos en la simulación presentan errores menores al 5% con respecto al modelo IEEE. De acuerdo a las simulaciones se establece que para la realización de estudios de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas se necesita el modelo completo propuesto por la IEEE, principalmente en redes eléctricas en las que los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas prevalecen, como es el caso de sistemas de 230 kV. Los sobrevoltajes simulados con la resistencia no lineal MOV type 92 dan como resultado errores cercanos al 20%, por lo que no se recomienda la utilización de este modelo para este tipo de eventos.

Según Ing. Isabel Lugo Nogueron, en su tesis “**SIMULACION DE LA OPERACIÓN DE APARTARRAYOS EN LINEAS DE TRANSMISIONES UTILIZANDO EL PROGRAMA ATP /EMTP**” indica.

...Con la aplicación de apartarrayos se evita el flameo inverso obteniendo un mejor comportamiento de la línea de transmisión ante las descargas atmosféricas. Se ha mostrado la gran utilidad de los programas ATP/EMTP, ATPDRAW y PLOTXY para realizar el tipo de análisis comprendidos en este trabajo. Este grupo de programas son eficaces en la obtención de parámetros, modelación versátil de componentes especializadas así como en la obtención de gráficas de calidad. Adicionalmente, es que son de distribución gratuita controlada. En ese ambiente de solución, la limitación en la representación de los componentes de la línea de transmisión y los apartarrayos queda del lado del usuario. Los datos y los modelos que el usuario utilice limitan la precisión de los estudios.

2.1.1. INFORME FINAL DE PERTURBACIONES DEL SEIN

- FECHA : lunes 28 de abril de 2008
- HORA INICIO : 17:57:20 horas
- EQUIPO : Banco de transf. 138/50 kV de la SS. EE. Paragsha I
- PROPIETARIO : Electro Andes

➤ CAUSA : Por descarga atmosférica

➤ DESCRIPCIÓN.- Desconectaron los bancos de transformadores de 138/50 kV de la SS. EE. Paragsha I y la línea L-6520 (Paragsha I -Excélsior) de 50 kV, debido a falla transitoria ocasionada por descarga atmosférica en la zona de Cerro de Pasco. Como consecuencia, la SS.EE. Paragsha I quedó fuera de servicio y se interrumpió 25.25 MW. A las 18:07 h, la línea L-6520 entró en servicio y se inició la normalización de carga de los clientes afectados. A las 18:19:55 h, los transformadores de la SS. EE. Paragsha I entró en servicio.

Fuente: *Coordinador del SEIN-COES*

Desconectó la línea l-6514/l-6516 (Carhuamayo - Shelby - Excélsior) de 50 kV por falla en la fase "R"

➤ FECHA : 9/2/2014 14:07:00

➤ EMPRESA : SN POWER

➤ DESCRIPCIÓN.- Desconectó la línea L-6514/L-6516 (Carhuamayo - Shelby - Excélsior) de 50 kV por falla en la fase "R" debido a descarga atmosférica. Como consecuencia se interrumpió el suministro de Mina Quiruvilca (7.3 MW), Trevali Perú SAC (4.7 MW) y San José (0.2 MW).

A las 14:09 h, se conectó la línea y se procedió a normalizar el suministro interrumpido.

Fuente: *Boletín Semanal "EGEMSA",2014*

2.2. SOBRETENSIONES

Son las características de las solicitaciones dieléctricas⁴ o de tensión, a las cuales está sometida una red eléctrica, tales como forma de onda y amplitud; dependen del origen de las mismas y pueden ser debidas a causas externas de la instalación, como la actividad atmosférica (rayos), o internas como la maniobra de equipamiento (líneas, transformadores, capacitores, etc.), resonancias o ferorresonancias, fallas, etc. En base a la forma de onda y origen.

2.2.1. NATURALEZA Y CLASIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES

Existen muchas causas por las que se pueden originar sobretensiones, por esta razón su estudio se realiza analizando su origen, forma de onda y tiempo de duración, conforme a estos criterios se da la siguiente clasificación:

- Sobretensiones permanentes a Frecuencia Industrial.
- Sobretensiones temporales a Frecuencia Industrial.
- Sobretensiones de frente lento o de Maniobra.
- Sobretensiones de frente rápido o de tipo Atmosférico.

⁴ *Que es aislante o mal conductor del calor o la electricidad.*

2.2.1.1. Sobretensiones permanentes a frecuencia industrial

Son tensiones que se originan bajo condiciones normales de operación, por lo que su frecuencia es igual o próxima a la frecuencia de operación del sistema (60 Hz) y al ser sobretensiones permanentes su duración es relativamente mayor a 3 600s (1hora). En la práctica el valor r.m.s.⁵ de estos voltajes puede variar de un punto a otro dentro del sistema, sin embargo para efectos del estudio de coordinación de aislamiento se asume como constante e igual al de la tensión más elevada de la red (V_s), que a su vez, para niveles de alto voltaje corresponde a la tensión más elevada para equipos (V_m), que por lo general fluctúa dentro de un rango $\pm 5\%$ de la V_n .

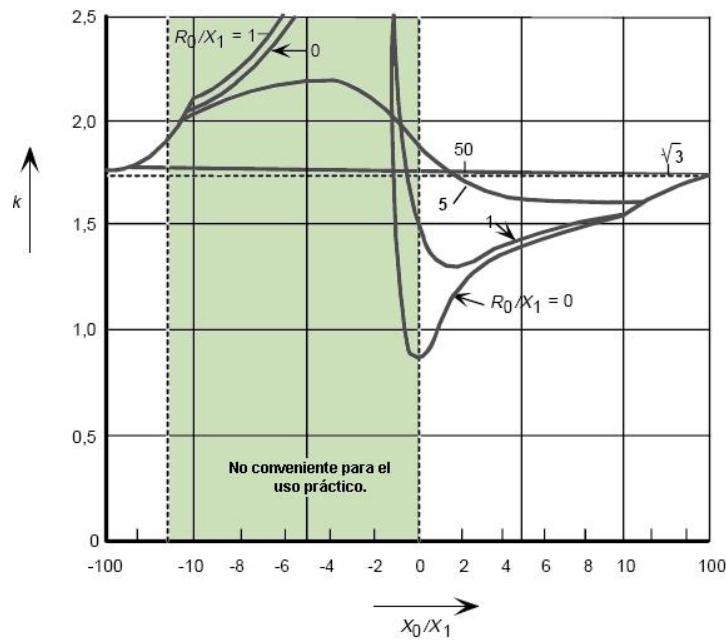
2.2.1.2. Sobretensiones temporales a frecuencia industrial

Las sobretensiones temporales se caracterizan por tener una duración relativamente larga, frecuencias cercanas a la fundamental, por lo tanto se consideran como de frecuencia industrial, y amplitudes inferiores a las de otros tipos de sobretensión. Estas sobretensiones generalmente se originan debido a fallas a tierra u operaciones de maniobra como por ejemplo: rechazo de carga, efecto ferranti, efectos de resonancia y ferresonancia; es así que de acuerdo al origen de la sobretensión se definen sus parámetros característicos como: amplitud, forma de onda y duración. A continuación se expone varias causas y fenómenos que provocan este tipo de sobretensión.

⁵ (*Root Mean Square – raíz media cuadrática*) es el valor eficaz de voltaje o corriente.

a) Fallas a tierra

La falla más común en los sistemas de potencia es el cortocircuito monofásico, es decir, una falla entre fase y tierra. Siendo menos probables las fallas bifásicas o trifásicas en las que la tierra no está involucrada.



Fuente: Coordinación de Aislamiento en Subestaciones - Náthali Morales Mariño

Figura N° 3: Factor de falla a tierra (k) en función de X_0/X_1 y $R_1/X_1 = R_f = 0$.

En base a la Figura 3, se puede identificar tres rangos de factores de falla a tierra, en función de los valores de la relación X_0/X_1 , y de acuerdo a la característica de conexión a tierra del sistema, así:

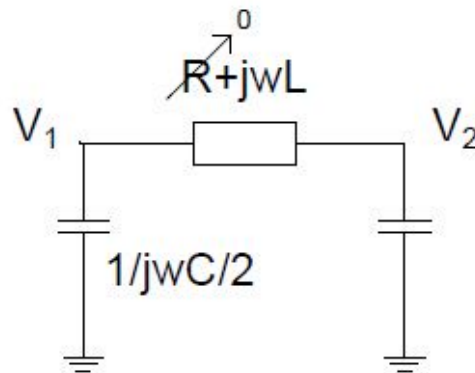
- El rango de valores altos de X_0/X_1 , positivos o negativos, se aplica para sistemas con conexión a tierra resonante o con neutro aislado.

- El rango de valores positivos y bajos de X_0/X_1 es válido para sistemas con el neutro conectado a tierra.
- El rango de valores negativos y bajos de X_0/X_1 , que corresponde a la zona sombrada en la figura 3, no es conveniente para aplicaciones prácticas debido a condiciones resonantes.

b) Rechazo de Carga

Un rechazo de carga podría suscitarse ante una operación indebida de un disyuntor, dando como resultado la elevación del voltaje en todo el sistema. Esto se debe a que ante la pérdida de carga, el flujo de corriente disminuye, por lo tanto el efecto capacitivo de las líneas se incrementa y la caída de tensión a través de las impedancias se reduce.

En sistemas con líneas relativamente cortas las sobretensiones generadas son bajas.



Fuente: *Análisis de sistemas de energía eléctrica – José Coto Aladro.*

Figura N° 4: *Modelo Pi matemático de una línea de transmisión.*

La Figura 4 muestra el modelo pi de una línea de transmisión, de donde al aplicar un divisor de tensión se puede obtener la relación entre el voltaje en el extremo sin carga y el voltaje en el extremo de alimentación de una línea bajo efecto Ferranti.

Considerando que $R \ll \omega L$, se puede despreciar la resistencia serie R y entonces se tiene:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2}}$$

Dónde:

- V_2 : Voltaje en el extremo abierto o sin carga de la línea.
- V_1 : Voltaje en el extremo dónde se está alimentando a la línea.
- L : Inductancia total de la línea en función de su longitud.
- C : Capacitancia total de la línea en función de su longitud.

En sistemas no muy extensos un rechazo de toda la carga puede generar sobretensiones fase-tierra con amplitudes inferiores a 1.2 p.u.⁶, y cuya duración puede ser de varios minutos dependiendo del equipo de control de voltaje asociado.

c) Resonancia y Ferrorresonancia

En un circuito eléctrico, la ferorresonancia se produce cuando se tiene las condiciones propicias, esto es tener al menos: una inductancia no lineal con circuito magnético saturable, un condensador y una fuente de tensión. En el caso de las redes eléctricas, la

⁶ El sistema por unidad (per-unit en inglés) de cualquier cantidad se define como la relación entre esta cantidad y la cantidad base y se expresa como un decimal.

ferrorresonancia puede aparecer debido a que transformadores de potencia, transformadores de tensión inductiva y reactancias en derivación, involucran inductancias saturables, mientras que, cables, líneas largas, transformadores de tensión capacitivos y condensadores de compensación serie o en derivación propician el efecto capacitivo. Esto hace que las redes eléctricas sean susceptibles de presentar configuraciones favorables para provocar el fenómeno de la ferorrresonancia.

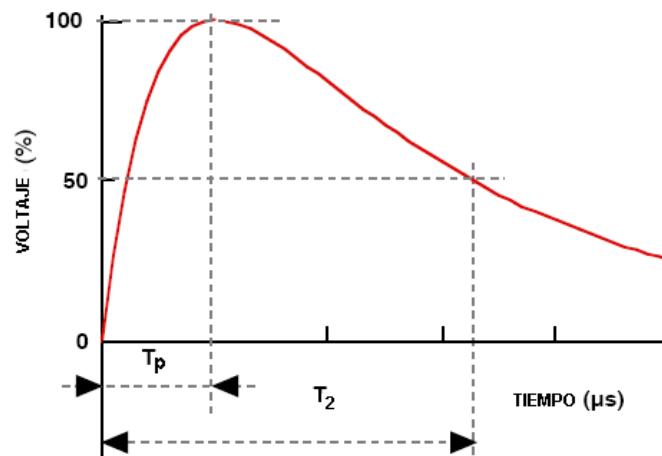
De las causas que provocan sobretensiones temporales anteriormente analizadas, cabe notar que, en sistemas con el neutro sólidamente conectado a tierra la sobretensión temporal de mayor amplitud y por tanto la más severa es la originada por rechazos de carga.

2.2.1.3. Sobretensiones de frente lento o de maniobra

Las sobretensiones de frente lento se originan ante la operación de equipos de maniobra o súbitas modificaciones en la topología de la red eléctrica, tales como: Energización y recierre de una línea, inicio y despeje de fallas, rechazos de carga y establecimiento o interrupción de corrientes capacitivas o inductivas.

Todos estos eventos provocan fenómenos transitorios que se traducen en una onda de sobretensión que se caracteriza por tener un frente de onda de algunas decenas a miles de microsegundos. Es así que los voltajes de prueba estandarizados de impulso tipo maniobra

tienen un frente de onda de entre 20 y 5 000 μs y un tiempo al valor medio de cola menor a 20 ms. Además, este tipo de sobretensiones son de mayor magnitud que las sobretensiones temporales.



Fuente: *Coordinación de Aislamiento en Subestaciones - Náthali E. Morales Mariño*

Figura N° 5: *Forma de onda típica de una sobretensión de frente lento.*

2.2.1.4. Sobretensiones de frente rápido o de tipo atmosférico

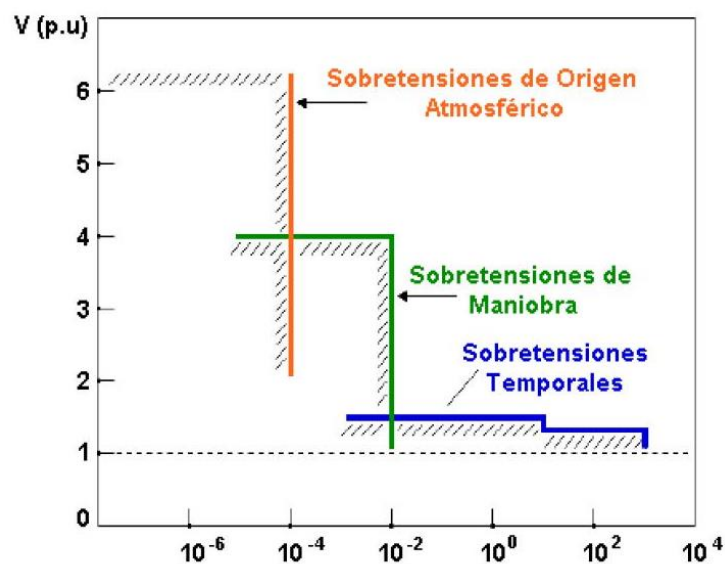
Las sobretensiones de frente rápido se originan a partir de descargas atmosféricas y operaciones de maniobra, siendo estas últimas de menor importancia debido a que su amplitud es mucho menor.

a) Descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas son un fenómeno natural muy común, es así que en el mundo se producen alrededor de 100 tormentas cada día.

La amplitud de las sobretensiones de origen atmosférico no tiene ninguna relación con la tensión de servicio, ya que por su naturaleza aleatoria puede llegar a ser muy elevada respecto a la tensión nominal del sistema. Sin embargo en sistemas con tensiones nominales mayores a 345 kV debido a su alto nivel de aislamiento, las sobretensiones atmosféricas no son determinantes, siendo las sobretensiones más relevantes las de maniobra.

Los efectos de las descargas atmosféricas, y por lo tanto las sobretensiones de frente rápido dependen del lugar en dónde cae el rayo respecto de la red.



Fuente: International Estándar IEC 60071-1, Insulation Co-ordination Part 1:

Figura N° 6: Características de las sobretensiones clasificadas según su origen.

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f=50 \text{ Hz ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ ms}$	$3 \text{ ns} < T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Parámetros de voltaje estandarizado	$f=50 \text{ Hz ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t (*)$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	(*)
Ensayo de voltaje tolerado normalizado	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	(*)
(*) a especificar por el comité del producto considerado					

Fuente: International Estándar IEC 60 071-1, Insulation Co-ordination Part 1:

Figura N° 7: Clases, formas de onda y rango de parámetros de voltajes y sobretensiones.

CAPÍTULO III

ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

En el planeta tierra ocurren un promedio de 100 descargas atmosféricas cada día. De acuerdo a teorías generalmente aceptadas, los rayos juegan un papel importante en un intento de la naturaleza por mantener un balance dinámico entre las cargas de las capas superiores de la atmosfera y la superficie terrestre.

Fue Benjamín Franklin quien demostró por primera vez la naturaleza eléctrica del rayo. Elevando una cometa en medio de una tormenta eléctrica y conduciendo una descarga hasta un condensador (botella de Leyden), demostró que había almacenado algo que presentaba el mismo comportamiento que las cargas eléctricas (que se generaban en esa época por fricción). Simultáneamente en otros lugares del mundo se realizaban investigaciones similares como la del científico ruso Giorgi W. Richman, quien pereció electrocutado en una de sus pruebas.

Más tarde, el mismo Benjamín Franklin quien inventaría el pararrayos, para defender las edificaciones y personas de los efectos del rayo. Se habla de protección, pues a pesar de tratarse de un evento natural de espectacular belleza, su poder destructivo debido a la gran energía que maneja en mínimos intervalos de tiempo, es muy grande.

Lamentablemente este fenómeno natural representa un potencial problema para las redes eléctricas, principalmente para las redes aéreas y a la intemperie que son las más afectadas, ya que se pueden generar sobretensiones que podrían provocar la falla del aislamiento de los equipos.

Las ondas de voltaje de prueba estandarizadas de impulso tipo rayo tienen un frente de onda de entre 0.1 y 20 μs y un tiempo al valor medio de cola menor a 300 μs . La amplitud se define como un valor máximo asumido o mediante una distribución de probabilidad de los valores picos.

3.1.1. CARGA ELÉCTRICA EN LAS NUBES

Las descargas atmosféricas se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera (alturas entre 5 y 12km). Al aumentar la carga se forman potenciales de hasta 300 MV entre nubes y tierra.

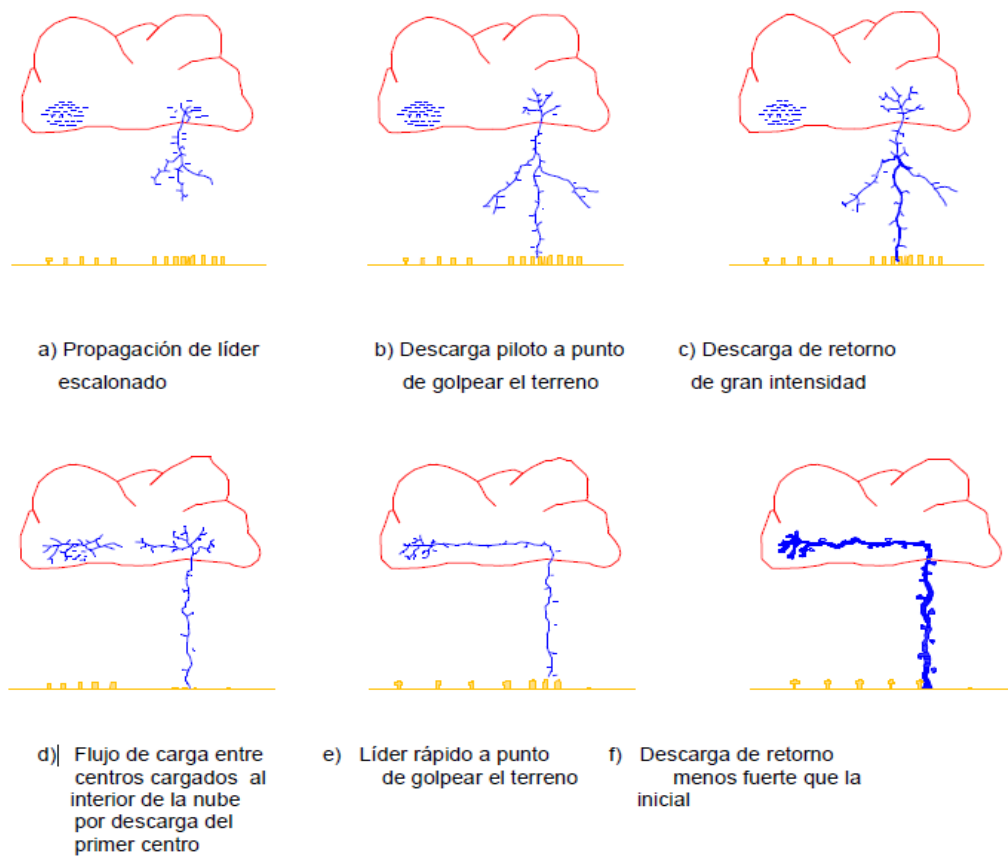
La carga eléctrica se forma al separar estas fuertes corrientes de aire, las partículas de agua y hielo en partículas ionizadas. La carga se concentra en un disco de un diámetro de 10 km. y una altura aproximada de 5 km. Esta carga es en la mayoría de los casos predominantemente negativa. A medida que se empieza a incrementar la carga y el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se empieza a rebasar el gradiente crítico, (30 kV en aire seco, 10 kV en las condiciones de presión y presencia de gotas de agua existentes en las nubes). Se empieza a presentar ionización del aire y por lo tanto, se van formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que es la tierra.

3.1.2. EVOLUCIÓN DE LA DESCARGA ELÉCTRICA

El camino de ionización que se inicia, lleva un primer flujo de carga hacia capas más bajas. Este primer flujo es llamado el líder. El líder desciende unos 50 a 100m en 1 μ s, detiene su marcha unos 50 μ s mientras se acumula la carga transferida desde la nube y se forma un nuevo camino ionizado que va a crear un nuevo avance del líder (figura 8). Estos avances y reposos de este primer flujo de carga, hacen que se le conozca como el líder escalonado. Este sigue avanzando hasta llegar cerca de los objetos y estructuras más altos, los cuales empiezan a emitir chispas que van al encuentro del líder.

Al cerrarse eléctricamente el camino a tierra, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciéndose la descarga de retorno de gran luminosidad, etapa del rayo

considerada como la más energética de todas. Luego, con intervalos de 0.01 a 0.1s se producen nuevos flujos de electrones hacia abajo, abriéndose paso por el camino ionizado que dejó el líder escalonado. Estos son los líderes rápidos que al golpear tierra producen descargas de retorno menos energéticas que la primera.



Fuente: *Electrical Transmission and Distribution reference book*

Figura N° 8: *Evolución de la descarga eléctrica.*

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA DESCARGA ELÉCTRICA

Al impactar la descarga “de retorno” la línea de transmisión, produce corrientes altísimas que aumentan en unos pocos μs . Se presentan corrientes pico entre 20 y 200 kA, aunque estas últimas son muy raras. La probabilidad de que se produzca una descarga mayor o igual a una determinada magnitud de corriente, se puede obtener de la figura 9. Aproximadamente el 90% de las descargas llevan carga negativa al sistema.

Se suele suponer en los cálculos, que la corriente aumenta linealmente desde cero hasta el valor pico en forma de rampa, con un determinado tiempo de duración (tiempo de frente o de cresta), que se estabiliza un instante en el valor pico y luego decrece más lentamente hasta volver a cero.

3.2.1. CURVAS TÍPICAS DEL PORCENTAJE DE RAYOS EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE DE DESCARGA

- De la AIEE B
- De Popolansky C
- De Anderson

Las características de corriente son diferentes cuando el objeto golpeado sobresale excesivamente del suelo. Así las mediciones hechas en el Empire State Building⁷ revelan valores de corriente diferentes a los mencionados, y aún mecanismos diferentes de la descarga. En estos casos el líder no sale de la nube sino del objeto alto.

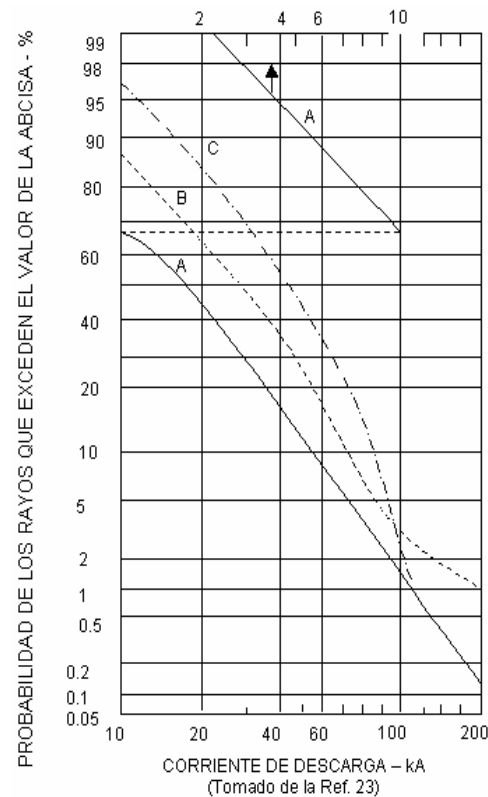


Fig 2

Fuente: *Electrical Transmission and Distribution reference book*

Figura N° 9: *Curva Típica de rayos en función de la corriente de descarga.*

⁷Es un edificio que está ubicado en el centro del Midtown de Manhattan y dispone de dos observatorios, situados en los pisos 86 y 102.

3.3. MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Son incontables las herramientas que se han utilizado para medir las corrientes y voltajes de los rayos, desde los usados en 1910 y 1930 como el klidonógrafo, el oscilógrafo, la cámara de Boys, los medidores de corriente de cresta (magnetic links), hasta los sofisticados equipos utilizados por el proyecto francés del Massif Central de producción y medición de rayos “artificiales”. Allí se emplean magnetic links, registradores de campo eléctrico y magnético cada uno con varios osciloscopios y equipo fotográfico integrado, goniómetro para localizar relámpagos; contadores CIGRE⁸ de relámpagos; Etc.

3.4. NIVEL CERAÚNICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

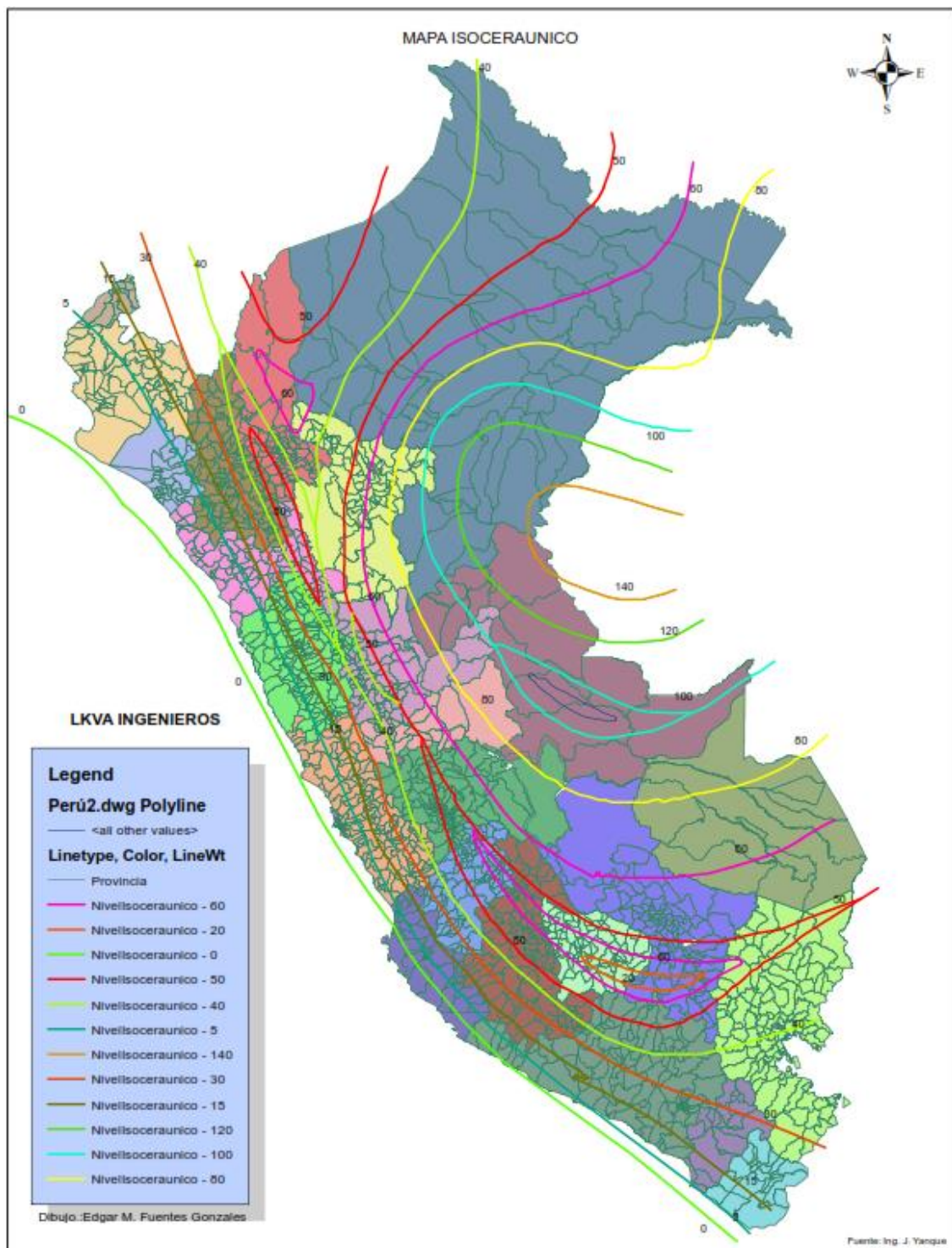
Se trata de una información aparentemente muy aproximada pero realmente útil. El mapa de Niveles Isoceraúnicos del Perú, incluye datos satélites, información continental, registros dispersos compatibilizados con la geografía y orografía territorial; destacan las siguientes zonas ecológicas de habitat natural:

⁸ *Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas, es una organización internacional no gubernamental sin fines de lucro creada en 1921, con sede central en París, reconocida mundialmente como una organización líder en sistemas eléctricos de potencia con miembros en más de 80 países.*

DESCRIPCION DE LA ZONA	ALTITUD (m.s.n.m.)	CANTIDAD
Sierra de baja altitud hacia el litoral o pie de monte.	: Hasta 2 000	(20)
Sierra de media altitud	: 2 000 – 3 500	(40)
Sierra de gran altitud	: 3 500 a más.	(50)
Microclimas de alta cota e interandinos		(de 40 - 70)
Zona Yunga, Valles altos	: 1 000 – 2 000	(60)
Selva baja o plana	: hasta 800	(120)
Selva alta o accidentada	: 800 – 1 500	(80)
Costa norte ecuatorial	: hasta 1 000	(15)
Costa centro Sur	: hasta 1 000	(0)

Fuente: Incidencia de las descargas atmosféricas - Iván Turco Aliaga

Tabla 5: Niveles Isoceráunicos en el Perú.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/131316771/Nivel-Isoceraunico-en-El-Peru#scribd>

Figura N° 10: Mapa de niveles Isoceraunicos del Perú.

CAPÍTULO IV

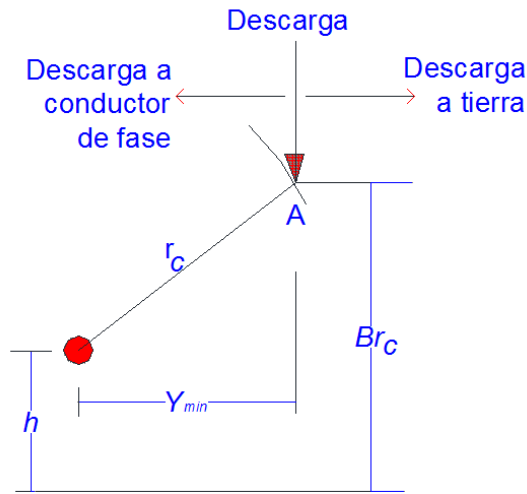
ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE PROTECCIÓN

4.1. APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS

El método más empleado actualmente para diseñar o analizar el comportamiento de una pantalla se basa en el método electro geométrico. Este modelo permite determinar el punto de impacto de una descarga para la que se supone generalmente un canal de propagación vertical. La figura 11 muestra su aplicación en una línea sin apantallar. Según el modelo electro geométrico, una descarga de intensidad cresta I alcanzará e conductor de fase si su trayectoria final cae a la izquierda del punto de intersección A, entre el arco de radio r_c , con centro en el conductor y calculado segunla siguiente expresión:

$$r_c = \alpha \times I^\gamma$$

Y la paralela situada a una altura $\beta \cdot r_c$ Sobre tierra.



Fuente: Riofrío Carlos., “Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas.”

Figura N° 11: Aplicación del modelo electrogeométrico a una línea aérea no apantallada.

En la aplicación del modelo se debe diferenciar, por tanto, entre el cálculo de radio de atracción de un conductor y la distancia de atracción a tierra. El cálculo de la distancia mínima, y_{min} , entre el canal vertical y el conductor de la línea se obtiene a partir de la siguiente expresión.

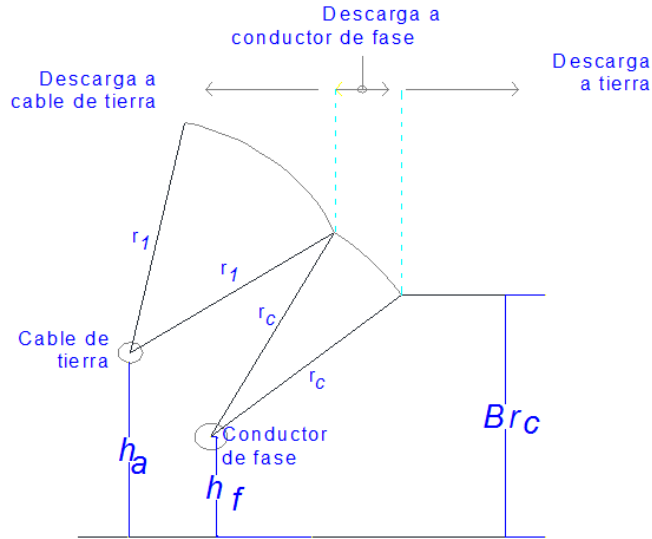
$$y_{min} = \sqrt{r_c^2 - (\beta \times r_c - h_f)^2} \quad \text{Para } \beta \cdot r_c > h$$

$$y_{min} = r_c \quad \text{Para } \beta \cdot r_c > h$$

Los valores de los distintos factores que intervienen en este cálculo dependen del autor que haya propuesto la aplicación del método. Algunos de los valores sugeridos son: $\alpha=10$; $\beta=0.9$; $\gamma=0.65$.

En caso de líneas apantalladas se debe tener en cuenta la zona de atracción del cable de tierra. Tal como muestra la figura 12 para una corriente máxima de descarga, puede existir una zona de atracción de los cables de tierra, otro de los conductores de la línea y finalmente otra zona en la que las descargas impactaran en tierra. El cálculo de la anchura de cada zona se realiza a partir de los radios de atracción que corresponden a los cables de tierra, r_s , y de conductores, r_c , son iguales y se calculan según:

$$r_c = \alpha \times I^\gamma$$



Fuente: Riofrío Carlos.

Figura N° 12: Aplicación del modelo electrogeométrico de una línea aérea apantallada.

$$y_{\min} = \sqrt{r_c^2 - (\beta \times r_c - h_f)^2} + \left(\frac{d}{2}\right)$$

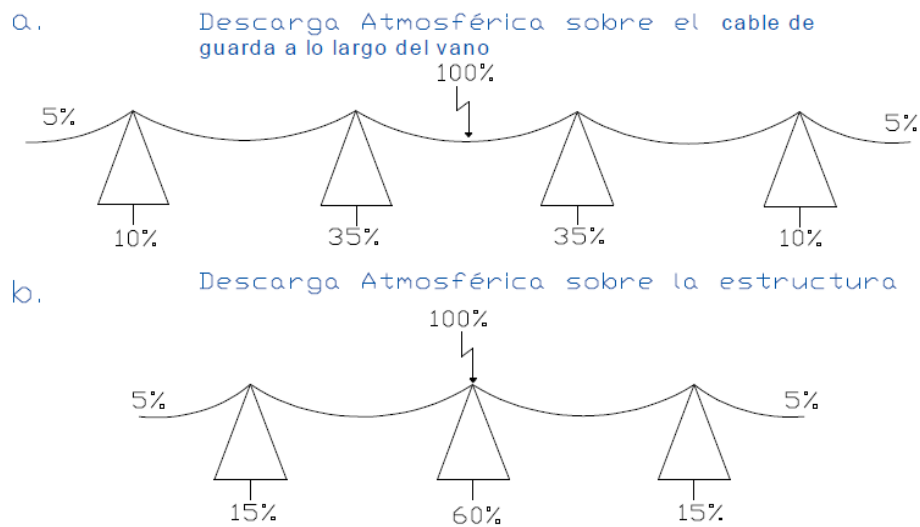
$$y_{\min, cg} = \sqrt{r_c^2 - (\beta \times r_c - h_{cg})^2} + \left(\frac{d}{2}\right)$$

Donde:

d : Distancia entre conductores más externos.

4.1.1. DESCARGA ATMOSFÉRICA SOBRE EL CABLE DE GUARDA A LO LARGO DEL VANO Y SOBRE LA ESTRUCTURA

La descarga atmosférica puede incidir tanto en una estructura, como en cualquier punto del cable de guarda a lo largo del vano; el caso en el cual por la torre se drena mayor cantidad de corriente, es cuando el rayo incide directamente sobre la estructura.



Fuente: *Transmisión Line Reference Book, 345 kV and above, second edition, 1982, EPRI.*

Figura N° 13: *Descargas atmosféricas en una línea eléctrica.*

Considerando que la onda de tension se divide hacia ambos lados:

$$V_{c1} = Z_c \times \left(\frac{I}{2} \right)$$

Z_c : Impedancia característica del conductor en Ω .

I : Intensidad máxima del rayo en A.

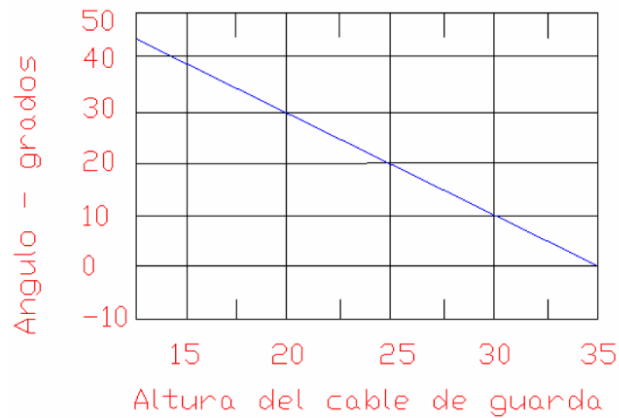
$$Z_c = 60 \times \ln \left(\frac{2 \times \gamma}{r_c} \right)$$

γ : Es la altura media o efectiva del conductor en metros.

r_c : Es el radio del conductor en metros.

4.1.2. ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO

Existen metodologías más o menos sencillas para la ubicación de la posición efectiva. La más sencilla de todas, es mediante una gráfica como la de la figura 14 en la cual se encuentra la combinación de altura del cable con el ángulo de apantallamiento, los cuales producen un buen funcionamiento de líneas.



Fuente: “Transmisión lines referente book 345 kV and above”, EPRI, 1975

Figura N° 14: Ángulo de apantallamiento.

4.1.2.1. Metodología para el Cálculo

El método supone que la línea describe una especie de sombra eléctrica sobre la tierra, de tal manera que cualquier rayo que normalmente caería en dicha sombra, se considera que hará contacto con la línea.

Calculo del número de descargas que inciden en la línea (descargas a los conductores, descargas a las torres o descargas al cable de guarda) depende de la mayor o menor área de exposición de la línea; la cual a su vez, está determinada por la altura y forma de la estructura, la disposición de los conductores y del cable de guarda, las características topológicas del corredor y la magnitud de la corriente de descarga. Un estimado del valor

medio del número de descarga a la línea (NL) considerando el cable de guarda es el siguiente:

$$NL = 0.12x(b + 4xY_G^{1.09})x\left(\frac{LxT}{1000}\right)$$

Donde:

b : Distancia de separación de cables de guarda.

Yg : Altura media del cable de guarda.

LI : Longitud de la línea en km.

T : Nivel isocerámico

El factor 0.12 es el propuesto en el libro rojo de EPRI

Burgsdorf, también proporciona una fórmula empírica para la probabilidad (P1 0/0) en que una descarga excederá el valor.

$$\text{Log}(P_1) = 2 - \left(\frac{I_{\min}}{60}\right)(I, \text{kA})$$

Siendo I_{\min} de descarga recomendada como descarga de diseño para este tipo de zonas 10kA siendo así se tiene que la probabilidad de ocurrencia es 67.6%.

4.1.2.2. Probabilidad de Falla de Apantallamiento

Existen varios métodos cuyo resultado de una determinada posición del cable de guarda, define una probabilidad de falla del apantallamiento.

El más directo de estos métodos es el que se basa en la ecuación de Burgsdorf Kostenko.

$$\text{Log}(P_{\theta}) = \theta_s \cdot \sqrt{\frac{h_t}{90}} - 2$$

θ_s : Ángulo de apantallamiento en grados.

P_{θ} : Probabilidad de falla de apantallamiento (%).

h : Altura del cable de guarda en metros.

Para encontrar el número de fallas por apantallamiento, se multiplica $P_{\theta}/100$ el número de descargas directas a la línea, por 100 km de longitud y por año (NL).

4.2. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE PARARRAYOS

Los pararrayos son elementos de protección contra sobretensiones los cuales tienen como propósito proteger a los equipos eléctricos contra voltajes transitorios, a través de la descarga a tierra de las corrientes de impulso, permitiendo la circulación de la corriente

de frecuencia industrial posterior al transitorio (corriente subsiguiente) y con la capacidad de repetir su función. Es decir, el dispositivo debe cumplir con las siguientes funciones:

- Comportarse como un aislador mientras la tensión aplicada no supere un valor determinado, superior a la tensión máxima del sistema.
- Comportarse como un conductor para descargar a tierra la onda de corriente producida por la sobretensión.
- Interrumpir la conducción de la corriente a tierra una vez que la sobretensión ha desaparecido del sistema y se ha restablecido la tensión nominal.
- No debe operar con sobretensiones temporales a frecuencia industrial.

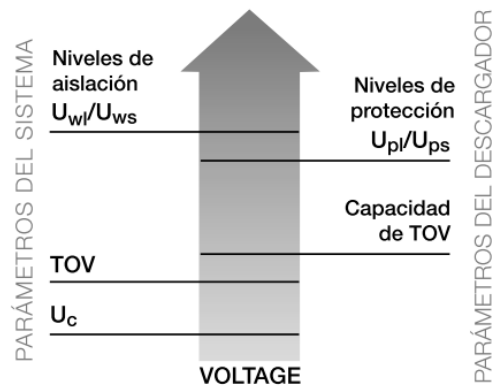
Las tensiones y sobretensiones a considerarse con respecto al uso de los dispositivos de protección son:

- Voltaje normal de funcionamiento (tensión más elevada del sistema).
- Sobretensiones temporales (TOV).
- Sobretensiones de frente lento (sobretensiones por maniobra).
- Sobretensiones de frente rápido (sobretensiones atmosféricas).

La Figura muestra la relación que debe existir entre los parámetros del sistema frente a los parámetros del pararrayos. Se puede observar que el voltaje de operación continua del pararrayos (V_c) debe ser mayor que la tensión máxima del sistema (V_s), que el pararrayos debe ser capaz de soportar las sobretensiones temporales que se puedan presentar y que

los niveles de protección del pararrayos frente a descargas atmosféricas y de maniobra (V_{pl} y V_{ps}) sean inferiores a los niveles de aislamiento respectivos (V_{wl} y V_{ws}).

Parámetros del sistema y del descargador



Glosario

U_m	Tensión máxima de red
U_c	Tensión de trabajo continuo
U_r	Tensión nominal
TOV	Sobretensión temporal
T	Factor de resistencia de sobretensión temporal
k	Factor de pérdida a tierra
U_{ps}	Nivel de protección de impulso de funcionamiento
U_{pl}	Nivel de protección de impulso de descarga
U_{ws}	Nivel de resistencia de impulso de funcionamiento
U_{wl}	Nivel de resistencia de impulso de descarga

Fuente: Libro de pararrayos ABB.

Figura N° 15: Características del pararrayos VS características del sistema

4.2.1. CONCEPTOS BÁSICOS

4.2.1.1. Voltaje de operación continua de pararrayos (V_c)

Se define como el valor máximo permisible de voltaje sinusoidal r.m.s. de frecuencia industrial que se puede aplicar continuamente entre los terminales del pararrayos, sin presentar problemas térmicos.

El criterio para la selección de V_c es que su valor pico debe ser mayor que el valor pico del voltaje más elevado de operación en el sitio de ubicación del pararrayos. En caso de que el voltaje más elevado de operación al sitio del pararrayos no se conozca con precisión, se debe considerar la tensión más elevada del sistema (V_s) o la tensión más elevada para el equipo (V_m).

Como regla general, se debe cumplir que el voltaje de operación continua del pararrayos debe ser:

- a) Igual o mayor que el valor pico del voltaje fase-tierra más elevado de operación dividido por $\sqrt{3}$ para el caso de sistemas con el neutro rígidamente conectado a tierra.

$$V_c \geq \frac{\hat{V}_{s.f-t}}{\sqrt{3}}$$

- b) Igual o mayor que el valor pico del voltaje más alto de operación. En el caso de tener sistemas con neutro aislado o resonante.

$$V_c \geq \hat{V}_s \quad \text{Ó} \quad V_c \geq \hat{V}_m$$

- c) En sistemas con presencia de armónicos de voltaje, el efecto del aumento en el valor pico de la tensión puede ser representado por un factor de seguridad de 1.05 aplicado sobre la tensión de frecuencia industrial.

$$V_c \geq 1.05 \times \frac{V_s}{\sqrt{3}}$$

4.2.1.2. Sobretensión temporal (TOV)

Corresponde al máximo valor de tensión eficaz de frecuencia industrial que al ser aplicado durante 10s entre los terminales del pararrayos no altera el correcto funcionamiento del mismo. Por lo tanto, TOV se relaciona con la capacidad del pararrayos para soportar sobretensiones temporales. Algunos fabricantes especifican este valor como TOV o capacidad de sobretensiones temporales y por lo general se lo define para 1 y 10 s.

A continuación se muestra un resumen de las principales causas, amplitudes y tiempos de duración de las sobretensiones temporales más importantes a ser consideradas:

Causa de la sobretensión	Amplitud fase – tierra(p.u.)	Duración
Falla a tierra.	$1.3 < V < 1.5$	Neutro rígido a tierra $\leq 1s$. Neutro resonante $\leq 10s$.
Rechazo de cargas en sistemas no muy extensos.	≤ 1.2	Varios minutos.
Rechazo de toda la carga en sistemas muy extensos.	≈ 1.5	Varios segundos.
Rechazo de carga en el transformador de un generador.	$1.4 < V < 1.5$	$\approx 3s$

Fuente: Libro de pararrayos SIEMENS.

Tabla 6, Sobretensiones temporales significativas.

La siguiente expresión es una aproximación que permite convertir la característica de amplitud versus duración de las sobretensiones temporales con una duración de entre 0.1 a 100s, a una amplitud equivalente V_{eq} con una duración de 10s y que por lo tanto corresponde a la capacidad de sobretensión temporal que el pararrayos debe ser capaz de soportar. Con esto se permite cumplir con el criterio de que para una característica de amplitud de sobretensión temporal en función del tiempo dada, se deberá seleccionar una característica de comportamiento del pararrayos más alta, esto significa que la capacidad de sobretensiones temporales del pararrayos debe ser mayor o igual que la sobretensión temporal equivalente más elevada obtenida de la siguiente expresión:

$$V_{eq} = V_t \left[\frac{T_t}{10} \right]^m$$

m : Es un exponente que describe la característica de la tensión a frecuencia industrial en función del tiempo del pararrayos. El valor de m varía entre 0.22 y 0.018 para diferentes diseños de pararrayos, sin embargo se puede usar el valor medio de 0.02.

V_t : es la amplitud de la sobretensión temporal.

T_t : Es la duración de la sobretensión temporal en segundos s.

V_{eq} : Es la amplitud de la sobretensión temporal de 10s, equivalente.

Se recomienda aplicar un margen de seguridad entre la sobretensión temporal equivalente máxima y la tensión asignada (TOV) con el propósito de cubrir posibles imprecisiones del

valor de la sobretensión temporal. Los valores para estos márgenes de seguridad varían entre el 5% y 15%.

Para determinar el valor de la mínima tensión nominal de un pararrayos se basa en principios empíricos y relaciona a la tensión nominal con el voltaje de operación continua con un factor k_e de 1.4 para sistemas sólidamente aterrados y 1.73 para sistemas con neutro aislado, tal como se describe en la siguiente expresión:

$$TOV \geq k_e \times \frac{1,05 \times U_s}{\sqrt{3}}$$

4.2.1.3. Tensión nominal del pararrayos (V_r)

La definición de tensión nominal del pararrayos dada en la norma, se apega más en función de las sobretensiones temporales (TOV) del sistema, considerando su amplitud y duración.

Para esto el fabricante proporciona curvas que permiten determinar un factor de sobretensiones temporales (k_{TOV}) en función del tiempo de duración de la sobretensión.

El factor k_{TOV} se define como la relación entre el valor eficaz de la tensión admisible de frecuencia industrial (TOV) y el valor eficaz de la tensión nominal del pararrayos.

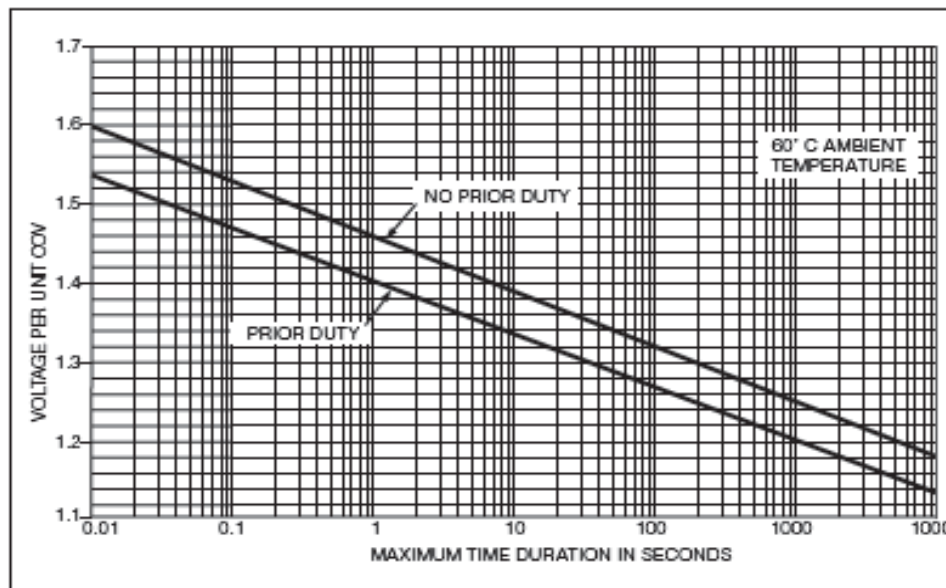
Entonces, la tensión nominal se puede determinar en función de TOV y k_{TOV} , tal como se indica en la siguiente expresión:

$$V'_r = \frac{TOV}{k_{TOV}}$$

V'_r : Tension nominal de preseleccion.

TOV : Sobretensión temporal a ser analizada.

k_{TOV} : Factor de sobretensión, dada por el fabricante a través de curvas en función del tiempo.



Fuente: Libro de pararrayos ABB.

Figura N° 16: Característica Tensión AC – Tiempo (TOV).

La Tensión nominal de los pararrayos también se puede estimar siguiendo la Tensión de Operación Continua (MCOV) y el factor de diseño k_o usualmente 0.8, según como se muestra en la siguiente expresión:

$$U_{r1} = \frac{1}{k_0} x MCOV$$

Por lo tanto la tensión nominal final del pararrayos U_r , adoptado será el mayor de los dos valores U_{r1} y V_r' , redondeado al número entero inmediato superior divisible por tres.

$$U_r = \max\{U_{r1}, U_r'\}$$

4.2.1.4. Corriente nominal de descarga (In)

Se define como el valor pico de una corriente tipo rayo normalizada de 8/20 μ s y sirve para hacer una clasificación de los pararrayos, según se muestra en la Tabla. Además, es el principal parámetro para establecer el nivel de protección y la capacidad de absorción de energía de un pararrayos.

	Valores de corriente nominal de descarga estandarizados.				
	20 kA	10 kA	5 kA	2,5 kA	1,5 kA
Tensión Asignada V_r (kV _{r.m.s} f-f)	$360 < V_r \leq 756$	$3 < V_r \leq 360$	$V_r \leq 132$	$V_r \leq 36$	^b
^a En algunos países, se acostumbra clasificar a los pararrayos de la siguiente manera: - Tipo estación para pararrayos de 10000 A y 20000 A; - Tipo Intermediario o Distribución para los pararrayos de 5000 A; - Secundario para los pararrayos de 1500 A. ^b El rango para bajas tensiones no está aún definido sino que está en estudio.					

Fuente: Libro de pararrayos SIEMENS.

Tabla 7: Clasificación del pararrayos de OM, sin explosores según I_n de descarga.

En se elige en función de la corriente de descarga tipo rayo que atraviesa el pararrayos, para la cual se busca la protección del equipo. Se debe de considerar que la corriente que llega hasta el pararrayos para ser descargada a tierra siempre será inferior que la corriente del rayo. Esto se debe principalmente a dos razones.

La primera se basa en estudios que establecen que la probabilidad de que el valor pico de una corriente debida a una descarga atmosférica sobre un conductor de fase tenga valores mayores a los 20 kA es baja, por esta razón se tiene valores normalizados de corrientes de descarga de hasta 20 kA.

La segunda contempla el hecho de que al presentarse una descarga atmosférica directa sobre un conductor de fase, las ondas de corriente que se propagarán a lo largo de la línea provocarán en la mayoría de los casos el flameo de su aislamiento, derivando a tierra parte de la corriente y haciendo que la onda de corriente que llega hasta la subestación sea una onda de corriente reducida.

La probabilidad de que una descarga atmosférica golpee al conductor de fase en el vano adyacente a la subestación es muy baja debido a su alto nivel de apantallamiento, de ahí que la onda de corriente deberá pasar por al menos una cadena de aisladores antes de alcanzar la subestación.

4.2.1.5. Clase de descarga de la línea

Se identifica la clase de descarga como un número relativo a la capacidad de absorción de energía de los pararrayos de 10 y 20 kA, aplicables para la descarga de líneas de gran longitud. De acuerdo con la norma IEC 60099-4 se definen cinco clases para las que, al incrementar el número de clase se incrementa también la capacidad de absorción de energía del pararrayos, así para los pararrayos de 10 kA se definen las clases de 1 a 3, mientras que para pararrayos de 20 kA se definen las clases 4 y 5.

La energía que el pararrayos debe ser capaz de absorber será la producida por las sobretensiones transitorias que se presenten en la red. A continuación se presentan las expresiones que permiten evaluar la energía a ser absorbida por el pararrayos según el tipo de sobretensión y en función del nivel de protección.

a) Cierre y Recierre de Líneas

$$W = 2V_{ps} (V_e - V_{ps}) \frac{T_w}{Z}$$

Es la energía a ser absorbida.

V_{ps} : Es el nivel de protección del pararrayos al impulso de maniobra (kV).

V_e : Es la amplitud de la sobretensión (kV).

Z : Es la impedancia característica de la línea (Ω).

T_w : Es el tiempo de propagación de la onda a través de la línea, cuyo valor corresponde al cociente entre la longitud de la línea (km) y la velocidad de la propagación de la onda en la línea (km/ μ s)

Vps o Vres nivel de protección está asociado con el valor pico de la tensión que aparece entre los terminales del pararrayos durante la circulación de la corriente de descarga, a esta tensión se la denomina tensión residual (Vres) o tensión de descarga. Los niveles de protección se especifican para impulsos tipo rayo y tipo maniobra.

Tensión asignada (V_r) kV r.m.s	20 kA V_{res} kV (pico) / V_r			10 kA V_{res} kV (pico) / V_r		
	Frente escarpado.	Tipo Rayo.	Tipo Maniobra.	Frente escarpado.	Tipo Rayo.	Tipo Maniobra.
3-29	-	-	-	2.6 – 4.0	2.3 – 3.6	2.0 – 2.9
30-132	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3	2.6 – 3.7	2.3 – 3.3	2.0 – 2.6
144-342	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3	2.6 – 3.7	2.3 – 3.3	2.0 – 2.6
360-756	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3	2.6 – 3.1	2.3 – 2.8	2.0 – 2.3
<p>Nota 1.- Las corrientes de frente escarpado, tipo rayo y tipo maniobra para las que resultan los presentes valores, están definidas según la norma IEC 60099-4.</p> <p>Nota 2.- El rango de tensiones residuales máximas mostradas son las normalmente disponibles. En donde, los valores inferiores corresponden a pararrayos con una clase de descarga de línea alta, y viceversa.</p>						

Fuente: Tesis, “Coordinación de Aislamiento en Subestaciones” – Nathali Morales M.

Tabla 8: Tensiones residuales para pararrayos de 20 y 10 kA en p.u. de la tensión asignada.

b) Maniobra sobre un Capacitor

$$W = \frac{1}{2} C \left[(3V_0)^2 - (\sqrt{2}V_r)^2 \right]$$

W : Es la energía a ser absorbida.

C : Es la capacitancia del banco de condensadores.

V₀ : Es el valor pico entre fase y tierra del voltaje de operación del sistema.

V_r : Es la tension asignada del pararrayos.

c) Descargas Atmosféricas

$$W = \left[2V_f - NV_{pl} \left(1 + \ln \left(2 \frac{V_f}{V_{pl}} \right) \right) \right] \frac{V_{pl} T_l}{Z}$$

W : Es la energía a ser absorbida.

V_{pl} : Es el nivel de protección del pararrayos al impulso tipo rayo.

V_f : Es la tension disruptiva de polaridad negativa del aislamiento de la línea.

Z : Es la impedancia característica de la línea.

N : Es el número de líneas conectadas al pararrayos.

T_l : Es la duración equivalente de la corriente de rayo que incluya a la primera y a

las subsiguientes descargas. Toma un valor típico de 3×10^{-4} s.

En la práctica la capacidad de absorción de energía del pararrayos se define únicamente en función de la expresión de cierre y recierre. Esto se debe a que las sobretensiones generadas por el cierre y recierre de líneas son las sobretensiones de frente lento más severas en sistemas del Rango I y por lo tanto exigen mayor capacidad de absorción. Criterio que es compartido por el fabricante, quien también considera la expresión de cierre y re cierre para éste cálculo. Sin embargo, en caso de que se conozca todos los parámetros que permiten evaluar las expresiones de maniobra en un capacitor y descargas atmosféricas es recomendable hacerlo para garantizar que el pararrayos seleccionado cubra también estos requisitos de absorción de energía, caso contrario la expresión de cierre y re cierre será suficiente.

La siguiente tabla muestra valores típicos de impedancia característica en función del voltaje nominal del sistema. La amplitud de la sobretensión se definirá de acuerdo a lo expuesto en el nivel de protección del pararrayos se elige de la información otorgada por el fabricante y el tiempo de propagación de la onda se calcula en función de la longitud de la línea y la velocidad de propagación cuyo valor típico es aproximadamente igual a la velocidad del rayo, que a su vez, corresponde a la velocidad de la luz, esto es 0.3 km/ μ s.

Tensión nominal del sistema (kV)	Impedancia característica $Z(\Omega)$
Inferior a 145	450
145 a 345	400
362 a 525	325
765	300

Fuente: Tesis, “Coordinación de Aislamiento en Subestaciones” – Nathali Morales M.

Tabla 9. Valores típicos de impedancia característica.

Una vez calculada la energía que el pararrayos debe ser capaz de absorber, se debe calcular la energía específica, dividiendo la energía a ser absorbida para el valor eficaz de la tensión nominal. Así:

$$W' = \frac{W}{V_r} \left[\frac{kJ}{kV(V_r)} \right]$$

El valor resultante para la energía específica calculado a partir de la expresión anterior, se debe entonces comparar con los valores normalizados mostrados en los catálogos de fabricantes para así seleccionar la clase de descarga de línea que a su vez también se debe comparar con las pruebas de descarga de línea según la Norma IEC 60099-4, que un pararrayos especificado para dicha norma debe cumplir, consisten en aplicar al pararrayos impulsos de corriente para simular su descarga, considerando condiciones exigentes de absorción de energía para así cumplir satisfactoriamente con las condiciones reales del

sistema. La capacidad de absorción de energía del pararrayos deberá ser mayor o igual que el doble del valor de energía específica calculado.

$$W = V_{res} (V_L - V_{res}) \frac{T_{wp}}{Z}$$

W : Energía a ser absorbida (en condiciones de prueba).

V_{res} : Mínimo valor de tensión residual a impulsos de maniobra (kV).

V_L : Tensión de carga del generador de impulsos.

Z : Impedancia característica de la línea (Ω).

T_{WP} : Tiempo de duración del pico.

Clasificación del Pararrayos.	Aplicación recomendada según el Rango de V_s (kV)	Clase de descarga de Línea.	Impedancia Característica de la Línea. Z (Ω)	Duración del pico. T_{wp} (μs)	Tensión de Carga. V_L ($kV_{d.c}$)
10 kA	Mayor a 245	1	$4.9 V_r$	2000	$3.2 V_r$
	Mayor a 300	2	$2.4 V_r$	2000	$3.2 V_r$
	Mayor a 420	3	$1.3 V_r$	2400	$2.8 V_r$
20 kA	Mayor a 525	4	$0.8 V_r$	2800	$2.6 V_r$
	Mayor a 765	5	$0.5 V_r$	3200	$2.4 V_r$
V_L es la tensión de carga usada para la prueba, y es análoga a la sobretensión V_e de la expresión 2.16.					

Fuente: Tesis, “Coordinación de Aislamiento en Subestaciones” – Nathali Morales M.

Tabla 10, Parámetros de la prueba de descarga de línea.

4.3. NORMAS CONSIDERADAS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para dar a conocer las características de resistividad de terreno y la resistencia de puesta a tierra de la malla en subestaciones, se emplean las siguientes normas como referencia; CEFAD E y IEEE 80(2 000).

Los valores obtenidos en las mediciones de resistencia eléctrica de las mallas tienen como propósito verificar el estado y la capacidad de disipar la corriente eléctrica para la protección de equipos y personas según el rango establecido por las normas mencionadas.

La finalidad de un sistema de puesta a tierra es:

- Reducir la resistencia de puesta a tierra de la estructuras para proteger la seguridad contra tensiones de toque y paso peligrosa, que puedan establecerse por corrientes de dispersión durante fallas a tierra de la línea.
- Proporcionar un camino fácil y seguro para las corrientes de dispersión que resulten de descargas atmosféricas y evitar de esta forma que se produce el fenómeno de flameo inverso (back flashover).

4.3.1. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El sistema de Puesta a Tierra presenta un sistema enmallado con conductores de cobre enterrado, la cual está provista de electrodos de aterramiento distribuidos en el área que comprende a las estructuras.

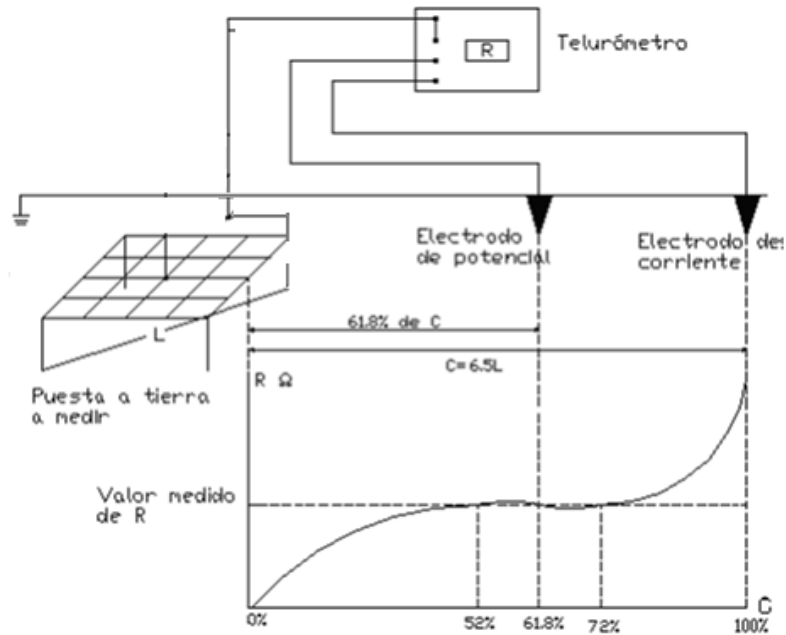
El Sistema de Tierra Superficial está ejecutado con cables de cobre blandos conectados desde la malla de tierra profunda hasta las estructuras de soporte metálicas, puntos de tierra de los equipos de maniobra y terminales del sistema de cables de energía y control.

Se efectuaron mediciones de puesta a tierra con el equipo de alta frecuencia (1 470 Hz), de marca Megabras, mediante el siguiente método:

4.3.1.1. Medición de resistencia: método del 62%

Este método indica que las zonas de influencia de puestas a tierra pueden ser tan grandes que para evitar su superposición se realizó la medida tomando distancias considerables entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra a evaluar.

La distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra a evaluar fue de 6.5 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra o el diámetro equivalente. El verdadero valor de la resistencia de puesta a tierra se obtiene con el electrodo de tensión ubicado a una distancia de $0.618C$ medido desde la malla.



Fuente: *Aterramiento Eléctrico – Geraldo Kindermann.*

Figura N° 17: *Medición al 62 %.*

El estándar IEEE Std 142-1991 “IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems” numeral 4.1.2, para subestaciones de potencia recomienda valores de 1.0Ω , incluyendo a líneas de transmisión y centrales de generación donde la corriente de cortocircuito son altas y conseguir esos valores hará que el costo sea oneroso. Sin embargo en instalaciones con menores corrientes de corto circuito se recomienda entre 1.0 a 5.0Ω .

4.4. ANÁLISIS DEL NIVEL DE AISLAMIENTO

Para verificar que un sistema de protección contra descargas atmosféricas tenga un correcto funcionamiento y pueda limitar los impulsos de onda, es necesario conocer los parámetros empleados en el análisis y verificar la coordinación de aislamiento.

Al seleccionar el nivel de aislamiento, nos referimos básicamente a fijar los niveles de aislamiento de los aisladores a lo largo de toda la línea en 50 kV.

4.4.1. CONDICIONES AMBIENTALES

4.4.1.1. Niveles de Contaminación

Según las condiciones de la zona de proyecto, de la Tabla N° 11 podemos elegir el nivel de contaminación a considerar en la selección del aislador adecuado, por lo que teniendo en cuenta la ubicación de la línea el nivel de contaminación elegido es ligero (I).

Nivel de Contaminación	Descripción del Ambiente
I Ligero	<p>Áreas sin industrias y con baja densidad de casas equipadas con calefacción.</p> <p>Áreas con baja densidad de industrias o casas pero sujetas a frecuentes vientos o lluvia. Áreas agrícolas</p> <p>Áreas montañosas</p> <p>Todas las áreas situadas de 10 km a 20 km del mar y no expuestas a vientos directos provenientes del mar.</p>
II Mediano	<p>Áreas con industrias que no producen humo contaminante y/o con densidad moderada de casas equipadas con calefacción.</p> <p>Áreas con alta densidad de casas pero sujetas a frecuentes vientos y/o lluvia.</p> <p>Áreas expuestas a vientos del mar pero no cercanas a la costa (al menos varios kilómetros de distancia).</p>
III Alto	<p>Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de casas con calefacción que generen contaminación.</p> <p>Áreas cercanas al mar o expuestas a vientos relativamente fuertes procedentes del mar.</p>
IV Muy Alto	<p>Áreas generalmente de extensión moderada, sujetas a contaminantes conductivos, y humo industrial, que produzca depósitos espesos de contaminantes.</p> <p>Áreas de extensión moderada, muy cercana a la costa y expuesta a rocío del mar, o a vientos muy fuertes con contaminación procedentes del mar.</p> <p>Áreas desérticas, caracterizadas por falta de lluvia durante largos períodos, expuesta a fuertes vientos que transporten arena y sal, y sujetas a condensación con regularidad.</p>

Fuente: IEC 815

Tabla 11 Niveles de Contaminación según Norma IEC 815.

4.4.1.2. Relación entre contaminación y distancia de fuga específica.

A cada nivel de contaminación descrito en la tabla 11, corresponde una distancia de fuga específica mínima nominal, en milímetros por kV (fase a fase) del voltaje más alto para el equipo, la cual aparece en la Tabla 12. La experiencia ha demostrado que el criterio de “distancia de fuga específica mínima”, la cual implica linealidad bajo contaminación entre voltaje sostenido y distancia de fuga, se aplica a la mayoría de los aisladores en los sistemas existentes.

Nivel de Contaminación	Distancia de fuga específica mínima nominal (mm/kV)
I Ligero	16
II Mediano	20
III Alto	25
IV Muy Alto	31

Fuente: IEC 815

Tabla 12: Cuadro de distancia de fuga, en base al nivel de contaminación.

4.4.1.3. Altitud sobre el nivel del mar

El área geográfica donde se localiza la línea es determinante en la selección del nivel de aislamiento de los pararrayos, pues la altura sobre el nivel del mar afecta los valores de voltaje de flameo de los aisladores, en virtud de que la reducción de la presión atmosférica

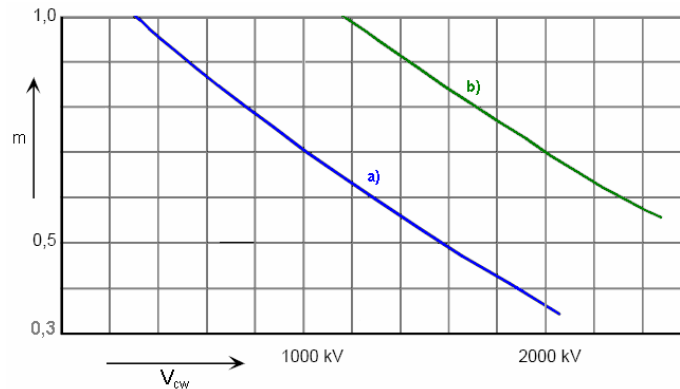
hace más propicias las condiciones de ionización del aire. Se aplica al aislamiento externo y sirve para compensar la disminución de la rigidez dieléctrica con el incremento de la altura sobre el nivel del mar.

$$K_a = e^{m \left(\frac{H-1000}{8150} \right)}$$

Donde:

H : Altura m.s.n.m.

M : Según la figura 18 para sobretensiones de maniobra, y $m=1$ para sobretensiones atmosféricas y temporales.



Fuente: IEEE Std 1410 – 2004.

Figura N° 18: Exponente m en función de V_{cw} .

a) Aislamiento fase – tierra.

b) Aislamiento fase – fase.

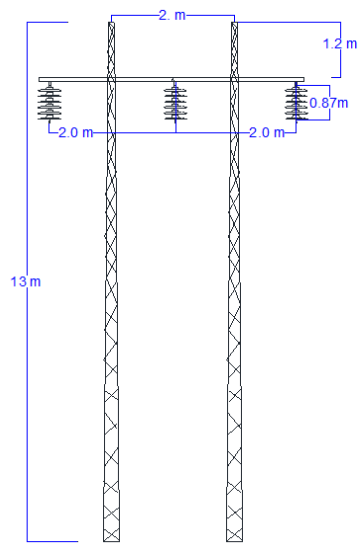
Nota: El exponente m depende de varios parámetros, incluyendo la ruta de descarga mínima que es generalmente desconocido en la etapa de diseño. La determinación del exponente m se basa en el estándar IEC 60-1.

CAPÍTULO V

MEMORIA DE CÁLCULO - IEEE 1410

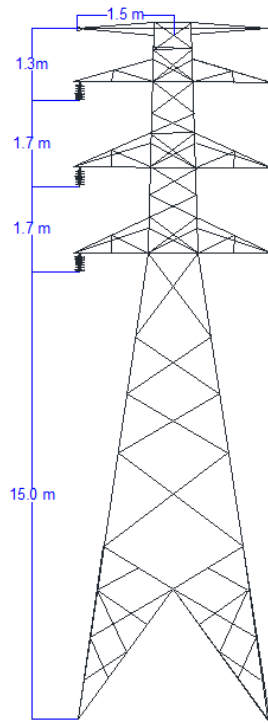
Los presentes cálculos de parámetros de la red eléctrica existente serán realizados tomando en consideración los datos recopilados en campo, entre los cuales tenemos los siguientes:

- Longitud media de vano: 130.0 m.
- Altura del conductor de fase: 16.0 m.
- Altura de conductor de guarda: 20.0 m.
- Altura de la torrecilla o poste: 20.0 m.
- Diámetro de conductores de fase AAAC de 120 mm² 14.0 mm
- Diámetro de conductor de guarda de A° G° 50 mm² 9.52 mm
- Altura de instalación: 4500 m.s.n.m.
- Nivel de polución: Nivel I
- Temperatura media anual: 4°C
- Aisladores tipo suspensión instalados ANSI 52-3



Fuente: Sociedad Minera EL BROCAL.

Figura N° 19: Modelo de torre en 01 empleado en la línea de 50 kV.



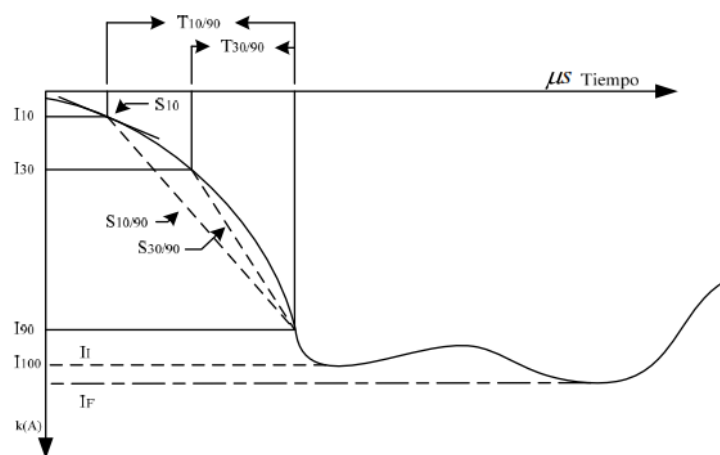
Fuente: Sociedad Minera EL BROCAL.

Figura N° 20: Modelo de torre 02, empleado en la línea de 50 kV.

NOTA: El nivel de polución ha sido determinado de la tabla N° 1 de la Norma IEC 60815 donde se señala que el NIVEL I corresponde a zonas sin industrias, con baja densidad de casas, o áreas con baja densidad de industrias o casas o áreas de agricultura, o áreas montañosas (todas estas áreas se deben encontrar a no menos de 10 o 20 km del mar y no deben estar expuestos a vientos directamente desde el mar).

Para el presente estudio, y para todos los casos se ha hecho el ajuste de la altura de los conductores de fase y la altura del cable de guarda, teniendo en cuenta sus respectivas flechas.

5.1. FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE DESCARGA



Fuente: IEEE Std 1410 – 2004.

Figura N° 21: Forma de onda de la corriente de Rayo, Standar IEEE 1410.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los parámetros de la primera descarga de un rayo según lo establecido por la IEEE Standard 1410.

Fuente: IEEE Standard 1410 (1997)

Parámetro	Media	Desviación estándar (σ)
Frente, μs		
$t_{10/90} = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576
$t_{30/90} = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553
$tm = I_F/S_m$	1.28	0.611
Pendiente, $\text{kA}/\mu\text{s}$		
Parámetro	Media	Desviación estándar (σ)
S_m , máxima	24.3	0.599
S_{10} , a 10%	2.6	0.921
$S_{10/90}$, 10-90%	5	0.645
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622
Corriente de cresta, kA		
I_F , inicial	27.7	0.461
I_F , final	31.1	0.484
Inicial/Final	0.9	0.230
Cola, μs	77.5	0.577
Carga, Q_t , C	4.65	0.882
$\int I^2 dt$, $(\text{kA})^2 \text{s}$	0.057	1.373

Fuente: IEEE Std 1410 – 2004.

Tabla 13: Parámetros de la primera descarga con distribución logarítmica Normal.

Esta forma de onda mostrada en la Figura 21 fue definida en IEEE Standard 1410 (1997), donde $T_{10/90}$ es el intervalo de tiempo entre el 10% y el 90% de la corriente pico del rayo, análogamente $T_{30/90}$ corriente pico. S_{10} , $S_{10/90}$ y $S_{30/90}$ es el intervalo entre el 30% y 90 % de la son las pendientes de ascenso desde 0 al 10%, del 10 al 90% y del 30 al 90% respectivamente del valor pico de la corriente del rayo.

5.2. CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROBABILIDAD DE CORRIENTE PICO $P(I)$

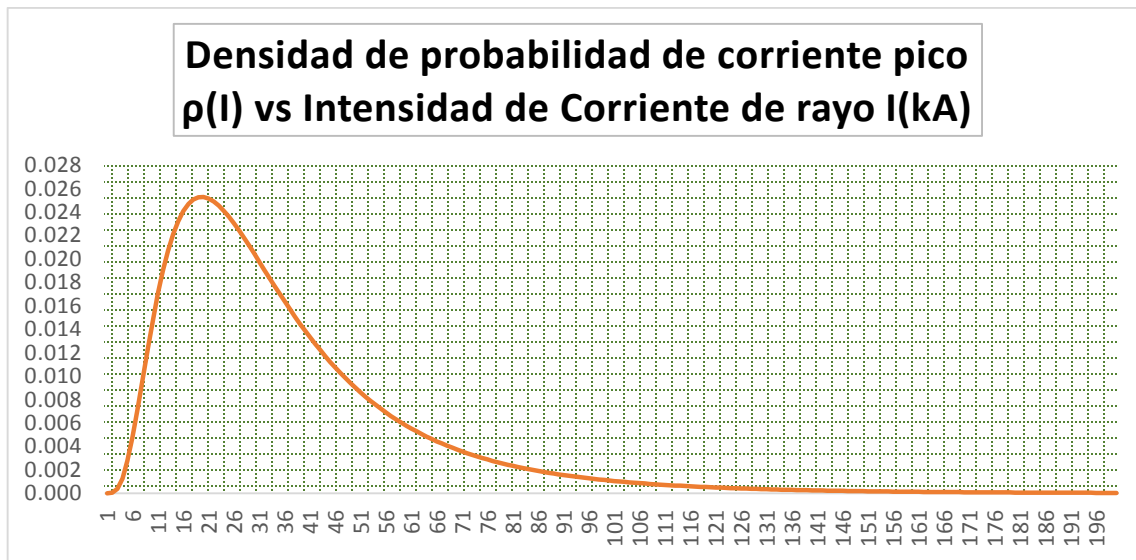
$$P(I) = \left(\frac{1}{\sigma_{\ln I} \times I \times \sqrt{2\pi}} \right) \times e^{\left\{ -\frac{1}{2} \times \left(\frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{\ln I}} \right)^2 \right\}}$$

Donde I y σ son el valor medio y la desviación estándar del logaritmo de la corriente de retorno del rayo. Estos valores están referidos a la primera descarga del rayo, que normalmente es la que presenta un valor de pico más elevado. De acuerdo a la práctica común se asume los siguientes valores.

$\sigma_{\ln I} = 0.65, I = 29.96kA$, Para descargas con polaridad negativa.

$\sigma_{\ln I} = 1.23, I = 35.16kA$, Para descargas con polaridad positiva.

NOTA: Puesto que a nivel mundial el 90% de las descargas a tierra son de polaridad negativa y tan solo el 10% es de polaridad positiva las que ocurren cuando las estructuras de soporte son demasiado altas (lo cual no es nuestro caso), se considerará para todos los cálculos que la descarga es de polaridad negativa.



Fuente: Propia – Obtenida de la tabulación.

Figura N° 22: Densidad de probabilidad de corriente pico.

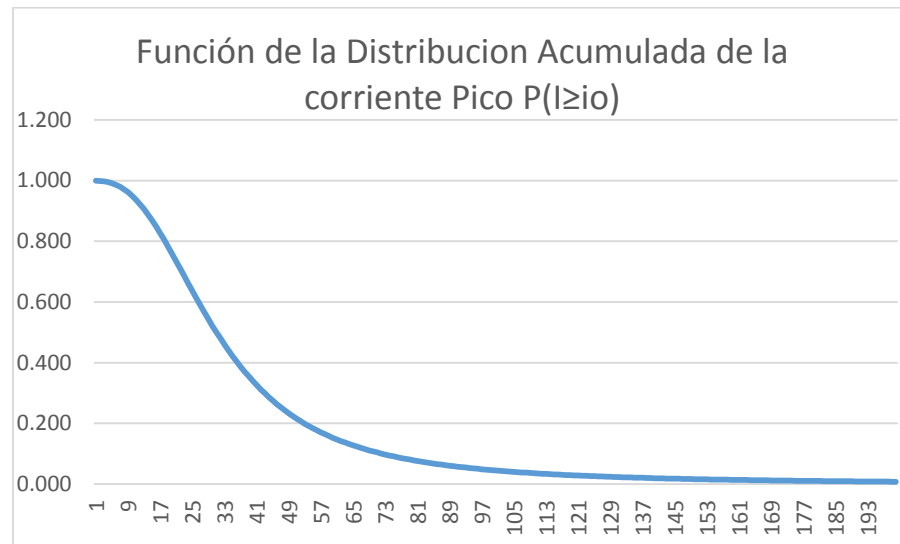
De la figura anterior se observa que los rayos que tienen mayor probabilidad de ocurrir (probabilidad mayor o igual a 0.02) son los que tendrán una intensidad entre 10 y 30kA aproximadamente, mientras que las intensidades superiores a 200kA son poco probables que ocurran.

5.3. CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE LA CORRIENTE PICO ($P(I > I_0)$)

La función de distribución acumulada permite calcular la probabilidad de que la corriente pico de un rayo, I sea igual o más grande que un valor determinado, I_0 .

Esta función se puede calcular mediante la siguiente aproximación puesta la literatura de Anderson/Eriksson (1978).

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{31}\right)^{2.6}}$$



Fuente: Propia – Obtenida de la tabulación.

Figura N° 23: Función de la distribución acumulada de la corriente.

De la figura se puede observar que la probabilidad de tener corrientes superiores a 10kA es prácticamente la unidad, es decir que casi todos los rayos que se precipitan a tierra superaran los 10kA en la intensidad de su corriente de retorno, mientras casi el 50% de las veces los rayos tendrán intensidad de aproximadamente 30 kA.

5.4. METODOLOGÍA SEGÚN VOISLAV PARA EL CÁLCULO DE SOBRETENSIÓN INDUCIDA DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Los tres factores principales tomados en cuenta en la determinación de los voltajes inducidos, según esta metodología son:

- Descarga de retorno, en la cual se asume la distribución temporal y espacial de la corriente de descarga a lo largo del canal.
- El campo electromagnético que irradia la descarga, el cual también es llamado LEMP (Ligthning Electromagnetic Pulse).
- El modelo de acoplamiento, el cual estudia la interacción entre el modelo LEMP y la línea de transmisión en la cual se induce.

Las simplificaciones del modelo son:

- Para el cálculo del LEMP, se asume que el plano de tierra es un conductor perfecto.
- El canal de la descarga atmosférica es modelado como una antena vertical a una distancia D de la línea.
- La línea de transmisión se representa como un mono conductor sin pérdidas el cual se encuentra situado a una altura h sobre el plano tierra.
- El diámetro del conductor se fija en 1cm.

- Se asume que la longitud de la línea es infinita, esto con la finalidad de evitar la influencia que pudieran tener los terminales de la línea en cuanto al máximo voltaje inducido.

$$V = (1 - C) \times Z \times k \times I + e$$

En donde:

V : Sobretensión producido por la descarga, en kV

C : Factor de acoplamiento entre conductores.

El factor de acoplamiento se debe calcular en caso que la línea este provista de cables de guarda de acuerdo a la siguiente expresión.

$$C = \frac{50}{Z_n} \times \log\left(\frac{b}{a}\right)$$

Donde:

Z_n: Impedancia de onda del cable de guarda, valor que puede suponerse igual a 500 Ω.

b: Distancia entre conductor y la imagen del cable de guarda, en cm.

a: Distancia entre conductor y el cable de guarda, en cm.

Como en las instalaciones existente el cable de guarda se encuentra en el eje de las ordenadas entonces, a=b.

Por lo tanto C=0

Z : Impedancia efectiva mirada desde el punto de descarga, Ω.

La impedancia efectiva se calcula teniendo en cuenta que:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_d} + \frac{2}{Z_n} + \frac{1}{R}}$$

Donde:

Z_d : Impedancia de onda de la descarga, que para fines prácticos se considera igual a 400Ω .

Z_n : Impedancia de onda del cable de guarda, valor que puede suponerse igual a 500Ω .

R : resistencia de puesta a tierra de la estructura en Ω , esta última debe considerarse 13.1Ω que es la resistencia mínima que debe considerarse para los sistemas de puesta a tierra de seccionamiento con pararrayos. Caso real (20.3Ω el valor más alto en las mediciones).

Entonces con los datos anteriores:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{2}{500} + \frac{1}{20.3}} \qquad Z = 17.94\Omega$$

k : Factor que toma en cuenta el efecto de reflexiones de la onda provocada por la descarga.

El factor “k” que depende de la onda provocada por la descarga depende del valor de la resistencia de la puesta a tierra de la estructura, longitud de los vanos de la línea y del tipo

de onda de la descarga. A pesar que su valor es menor que 1, para efectos prácticos se considera igual a 1.

I : Intensidad de la corriente de la descarga, en kA.

La corriente de descarga “I” es un parámetro que se ha determinado en el ítem 5.2

$\sigma_{inI} = 0.65, I = 29.96kA$, Para descargas con polaridad negativa

e : Voltaje nominal de la línea, en kV.

Este valor va a depender de la tensión nominal del alimentador en estudio.

Alimentador Smelter- Cinco Manantiales, 50 kV

$$V = (1 - C) \times Z \times k \times I + e$$

$$V = (1 - 0) \times 17.94 \times 1 \times 29.96 + 50kV$$

$$V = 587.48kV$$

Si tenemos que la tensión crítica disruptiva al impulso tipo rayo del aislador 52-3 es de 125 kV (492 kV en 6 unid), quiere decir que una intensidad de rayo de 29.96 kA tiene la mayor probabilidad ocurrencia, además de un 50% de probabilidad de ser superior; causaría un flameo y por ende una interrupción de manera impredecible e irresistible.

5.5. CÁLCULO DE TASA DE FLAMEOS POR DESCARGAS DIRECTAS SEGÚN LA IEEE 1410

5.5.1. DENSIDAD DE RAYOS POR km² SEGÚN IEEE 1410

IEEE Standard 1410 (1997) define la densidad de rayos a tierra como “el numero promedio de descargas a tierra por unidad de área y unidad de tiempo en una región particular”.

$$Ng = 0.04T^{1.25}$$

Donde:

Ng : Densidad rayos a tierra en km² por año, en descargas/km²-año.

T : Nivel ceraunico de la zona en estudio, en días de tormenta al año (para la zona en estudio esta se va a considerar igual a 60 de acuerdo al mapa de niveles isoceraunicos del Ing. J. Yanque 2005).

$$Ng = 0.04 \times 60^{1.25}$$

$$Ng = 6.68 \text{ Rayos/km}^2$$

Dado que el indicador de incidencia es a través de un área, ahora le objetivo es representarla en forma de franja en tramos lineales.

5.5.2. DENSIDAD DE RAYOS POR km/Año SEGÚN IEEE 1410

Los rayos pueden tener un efecto significativo en la confiabilidad de la línea, especialmente si los postes son muy altos sobre el terreno. Mayor cantidad de impactos de rayos son recibidos debido a las altas estructuras.

La tasa de recepción de impactos de rayo N por km/año se halla por medio de la siguiente ecuación.

$$N = Ng \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) = \mathbf{115} \text{ (rayos/100km/año)}$$

Donde:

N : Es la tasa de colección de rayos (rayos/100km/año).

Ng : Es la densidad de rayos a tierra de la ecuación anterior (rayos por km² por año).

h : Es la altura del conductor más elevado en el poste.

b : Es el ancho de la estructura.

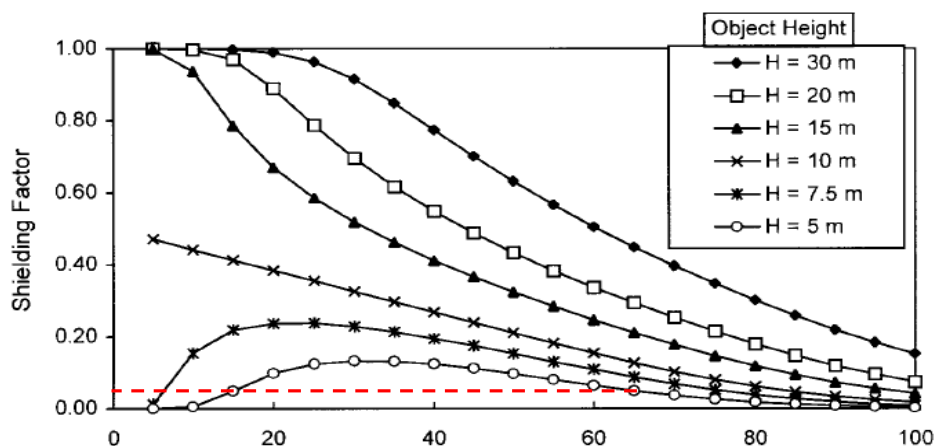
Este análisis se realizara de manera independiente para los tipos de armados típicos instalados.

5.5.3. APANTALLAMIENTO NATURAL SEGÚN IEEE 1410

Un factor importante para la estimación de descargas directas es el apantallamiento de las redes de distribución de energía eléctrica que habitualmente cuenta con una protección natural, entre ellos se puede encontrar edificaciones o árboles que reducen involuntariamente el número de descargas directas a la línea, en la siguiente dada por la norma IEEE Std 1410 se puede obtener el factor de apantallamiento natural con la cual calcularemos el número estimado de descargas directas.

$$N_f = N \times fa$$

fa : Es el factor de apantallamiento natural.



Fuente: IEEE Std 1410 – 2004.

Figura N° 24: Distancia de objeto desde la línea de distribución (m).

Entonces el factor de apantallamiento natural para todos los alimentadores es 0.05.

5.5.4. CÁLCULO DE TASA DE FLAMEOS POR DESCARGAS INDIRECTAS SEGÚN LA IEEE 1410

5.5.4.1. Voltaje crítico de contorneamiento o flameo (CFO)

Haciendo uso de las recomendaciones de la Norma Std. 1410-2010 se determina el CFO más crítico del sistema como:

$$CFO_T = CFO_{ais} + CFO_{seg} + CFO_{ter} + \dots + CFO_n$$

Donde:

$$CFO_{seg} = 0.45 \times CFO_{ais}$$

$$CFO_{ter} = 0.2 \times CFO_{ais}$$

La definición de los parámetros es la siguiente:

CFO_{ais} : Es el voltaje crítico de contorneamiento del aislamiento primario.

CFO_{seg} : Es el CFO adicional agregado por el segundo componente.

CFO_{ter} : Es el CFO adicional agregado por el tercer componente.

Se considerarán los valores tomados de las normas IEEE 1410, de las versiones 1997 y 2010, además valores de tablas técnicas comunes a los fabricantes de aisladores tipo suspensión en lo referente a la Tensión crítica de flameo al impulso de polaridad negativa:

Componente	CFO
6 Aisladores suspensión ANSI 52-3	750 kV
Aire	600 kV/m
Poste CAC/ Estructuras metálicas	0 kV/m
Cruceta de F°G°	0 kV/m

Fuente: Propia – Obtenida de los resultados.

Tabla 14: Valores estándares de CFO, para diversos componentes.

De acuerdo a las especificaciones de la norma IEEE 1410-2010, los valores deben ser corregidos debido a las condiciones atmosféricas.

$$CFO_{cond.2} = CFO_{cond.1} \times CFO_{cond.2}$$

Donde la condición 1 implica los valores de la tabla anterior y la condición 2 implica las condiciones a temperatura ambiente y altura sobre el nivel del mar de las líneas de transmisión de la zona en condiciones reales, es decir 4°C y 4 500 m.s.n.m. respectivamente.

$$d = \left(\frac{3.92 \times b}{273 + T} \right) \quad \log(b) = \log(76) - \left(\frac{h}{18336} \right)$$

Donde h , es la altura en m.s.n.m., b es la presión barométrica en (cm/Hg) y T es la temperatura ambiente promedio anual en la condición específica. Considerando $d = 0.63$

Componente	CFO cd2
6 Aisladores suspensión ANSI 52-3	492 kV
Aire	600 kV/m
Poste CAC/ Estructuras metálicas	0 kV/m
Cruceta de F°G°	kV/m

Fuente: Propia – Obtenida de los resultados.

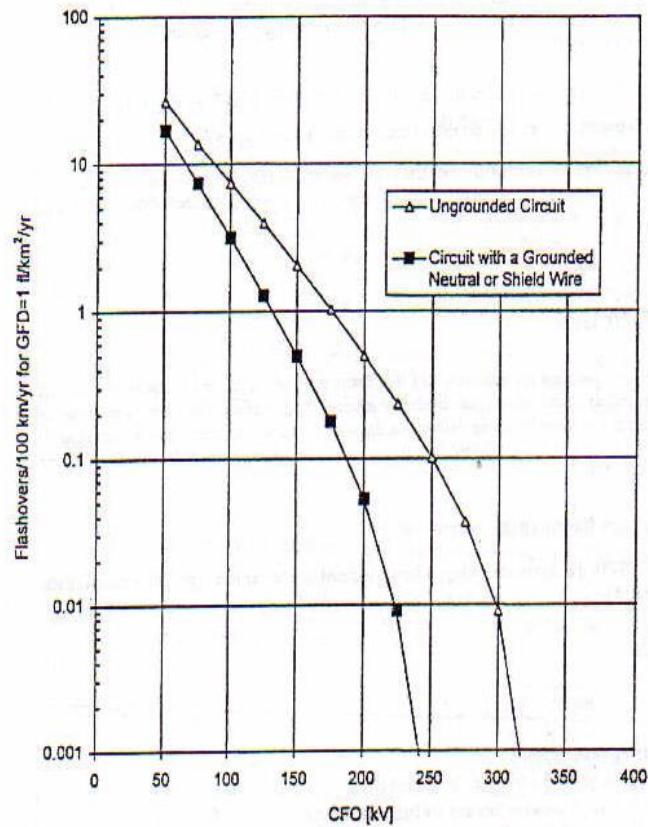
Tabla 15: Valores estándares de CFO, corregido por criterio atmosférico.

5.5.4.2. Curva de flameos inducidos VS voltaje crítico de contorneamiento (CFO)

La norma IEEE⁹ establece una curva característica de tal forma de obtener el número de interrupciones según el grado de CFO que tengan las estructuras, tener en cuenta que la unidad de ordenada es:

⁹ En inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers, es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas

Es por ello que el índice de resultado se debe multiplicar por el factor N_g para obtener el número de salidas por flameos inducidos. Entonces el número total de salidas por flameos inducidos quedaría:



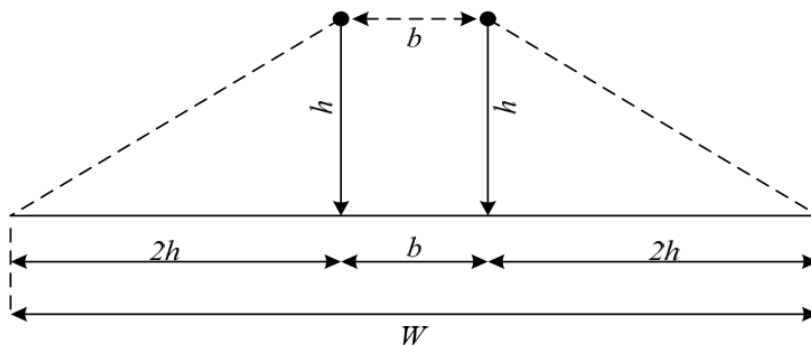
Fuente: IEEE Std 1410 – 2004.

Figura N° 25: Número de flameos de tensiones inducidas versus nivel de aislamiento de la línea de distribución, voltaje de flameo de impulso crítico, CFO en kV.

5.6. ESTIMACIÓN DE SALIDA A LA IMPLEMENTACIÓN DE CABLE DE GUARDA

5.6.1. SOMBRA ELÉCTRICA

Se considera una zona de influencia sobre el cual podría terminar la descarga en la línea y fuera de esta terminaría en el terreno. A esta zona la determina la altura del punto más alto sobre la línea, la cual corresponde a la altura efectiva del cable de guarda y la separación horizontal entre estos cables, si existe más de uno. (Anderson, 1982).



Fuente: Tomada de Transmisión Line Referente Book, 345 kV and above, second edition, 1982, EPRI.

Figura N° 26: Sombra eléctrica de la línea.

Lo propuesto por Anderson, J. (1982) para determinar la sombra eléctrica de la línea apantallada por dos cables de guarda es lo siguiente:

$$W = b + 4 \times h^{1.09}$$

Donde:

W : Ancho de la sombra eléctrica.

b : Separación horizontal entre los cables de guarda.

h : Altura efectiva de los guarda sobre el terreno.

La altura efectiva del cable de guarda consiste en considerar la altura del mismo en la estructura y la altura a mitad del vano, a este parámetro también se le denomina flecha de la línea y está dado por la siguiente ecuación.

$$h = h_g - \frac{2}{3} \times (h_g - h_{gv})$$

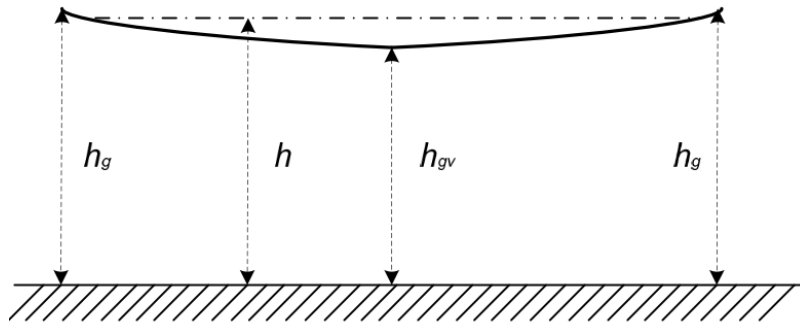
Donde:

h : Altura efectiva de los cables de guarda sobre el terreno.

h_g : Altura de los cables de guarda en la torre.

h_{gv} : Altura de los cables de guarda a mitad del vano.

Esta expresión puede usarse para calcular la altura efectiva de cualquier conductor ya sea de fase o conductor de guarda, lo importante es poder representar los datos correspondientes según sea el caso.



Fuente: Tomada de Transmisión Line Referente Book, 345 kV and above, second edition, 1982, EPRI.

Figura N° 27: Representación de la altura efectiva.

Para el cálculo de la flecha de cable de guarda para conductor de 50mm² EHS¹⁰:

$$fcg = 0.0009 \times \frac{l^2}{20}$$

Donde l es la longitud media de un vano de la línea en metros, para el caso de los alimentadores presentan vanos promedios de 100m por ello se tiene que:

$$fcg = 0.0009 \times \frac{130^2}{20} \qquad fcg = 0.76m$$

Entonces, como se tiene estructuras de 20m de altura con 13m de altura libre entonces se puede establecer lo siguiente:

¹⁰ Extra High Strength, son los cables de acero galvanizado de extra alta resistencia para retenida y utilizados como cable de guarda que cumplen con la siguiente especificación: ASTM-A-475 (Cables de acero galvanizado)

$$h = 20 - \frac{2}{3} \times (0.76)$$

$$h = 19.49m$$

Como en su mayoría se trata de torres de celosía, y con un solo cable de guarda se determina que $b=0$, entonces el ancho de sombra eléctrica para las estructuras de las zonas en estudio quedaría:

$$W = b + 4 \times h^{1.09}$$

$$W = 0 + 4 \times 19.49^{1.09}$$

$$W = 101.85m$$

5.6.2. CÁLCULO DE DESCARGAS DIRECTAS A LA LÍNEA CON CABLE DE GUARDA

$$NL = \frac{Ng \times W \times L}{1000}$$

Donde:

NL : Numero de descargas directas a línea con cable de guarda.

Ng : Densidad de rayos a tierra.

W : Sombra eléctrica de la línea.

L : Longitud de la línea, en km

En caso de considerar longitud de 7 km este último estaría en salidas/100km/año.

$$NL = \frac{6.67 \times 101.85 \times 7}{1000} \text{ salidas/100km/año}$$

$$NL = 8.831 \approx 9 \text{ salidas/100km/año}$$

CAPÍTULO VI

MODELAMIENTO Y RESULTADOS DE LA LINEA DE 50 kV

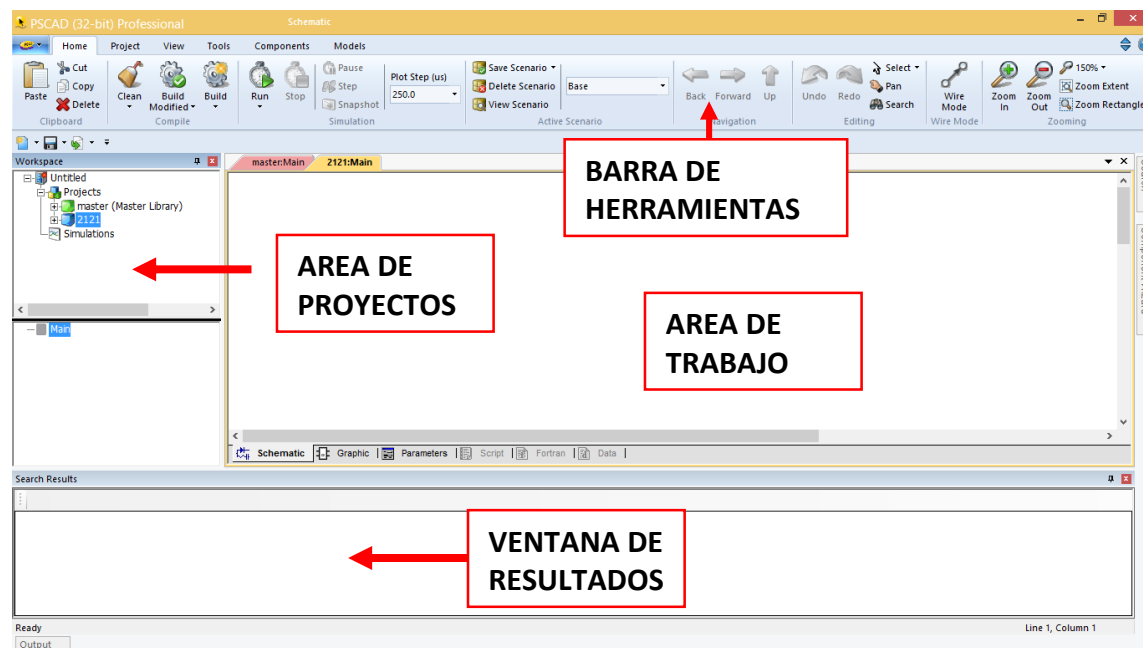
6.1. SOFTWARE MATRIX EMTCD

El Electromagnetic Transients Including (EMTCD) es un software que representa y resuelve problemas de transitorios electromagnéticos y electromecánicos mediante ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo, las soluciones son calculadas para un paso de tiempo determinado. El EMTCD hasta hoy en día funciona como motor de las simulaciones realizadas en el PSCAD para el estudio de transitorios en sistemas de potencia, sean de corriente alterna o corriente continua, también es capaz de simular máquinas sincrónicas y sobretensiones por descargas atmosféricas.

6.2. SOFTWARE INTERFAZ PSCAD

El Power Systems CAD (PSCAD) es una potente interfaz gráfica que trabaja usando como motor al EMTDC, esta interfaz permite al usuario construir esquemáticamente un sistema

eléctrico, simular su comportamiento y analizar los resultados, todo esto dentro de un entorno gráfico, también posee opciones para realizar el control de la simulación, colocar instrumentos de medición, y varias herramientas para representar variables de un sistema. El PSCAD es un software diseñado para trabajar en un entorno Microsoft Windows, como se observa en la figura 36 donde se aprecian las diversas zonas en las que se divide el entorno gráfico del PSCAD.



Fuente: Propia – Obtenida de la matriz PSCAD:

Figura N° 28: Entorno grafico del PSCAD.

6.3. REPRESENTACIÓN DE LA LÍNEA AÉREA EN EL PSCAD

La modelación del sistema de distribución en el software PSCAD se realizó atendiendo a los principios propuestos por Martínez (2004) quien realizó un modelo unifilar de una línea de transmisión, a pesar de que el modelo realizado es trifásico la filosofía usada para representar el sistema fue aplicable.

6.3.1. REPRESENTACIÓN DE LA LÍNEA

La línea aérea se representó por tramos cuya longitud es la de un vano, el modelo usado es el modelo de Bergeron, debido a que el PSCAD no cuenta con el modelo de JMARTI, lo cual no representa ninguna limitante pues el modelo Bergeron también está fundamentado en el modelo de la onda viajera y con parámetros distribuidos estableciendo en este la cantidad de fases, la disposición geométrica y características de los conductores.

El conductor de guarda se representó de forma independiente para poder tener la posibilidad de hacer que la descarga del rayo incidiera sobre este, para ello también se usó el modelo de Bergeron pero estableciendo la impedancia de onda del conductor de guarda para poder considerar el efecto de la onda viajera en el tiempo.

6.3.2. IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE LA LÍNEA

Según el modelo matemático:

$$Z_c = 60 \times \ln \left(\frac{2 \times \gamma}{r_c} \right)$$

γ : Es la altura media o efectiva del conductor en metros.

r_c : Es el radio del conductor en metros.

	Terreno Ondulado
Scon =	120 mm ²
h =	18.4 m
r_c =	0.00618 m
Zc =	521.5161Ω

Fuente: Propia.

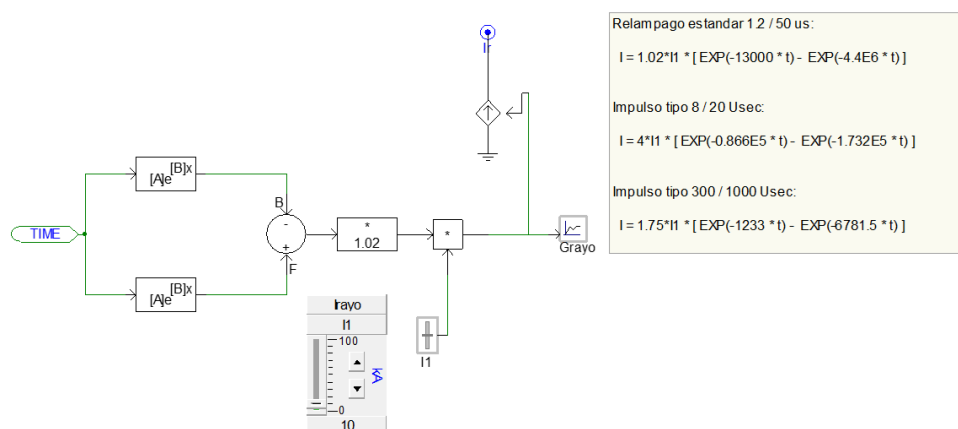
Tabla 16: Cuadro de la impedancia característica de la línea de 50 kV.

6.4. CORRIENTE DEL RAYO

Es representada mediante la sustracción de dos funciones exponenciales, un multiplicador y un control de amplitud de onda el cual tiene asociado un panel de control digital para cambiar el valor de la corriente que se desee, el mismo controla una fuente de corriente

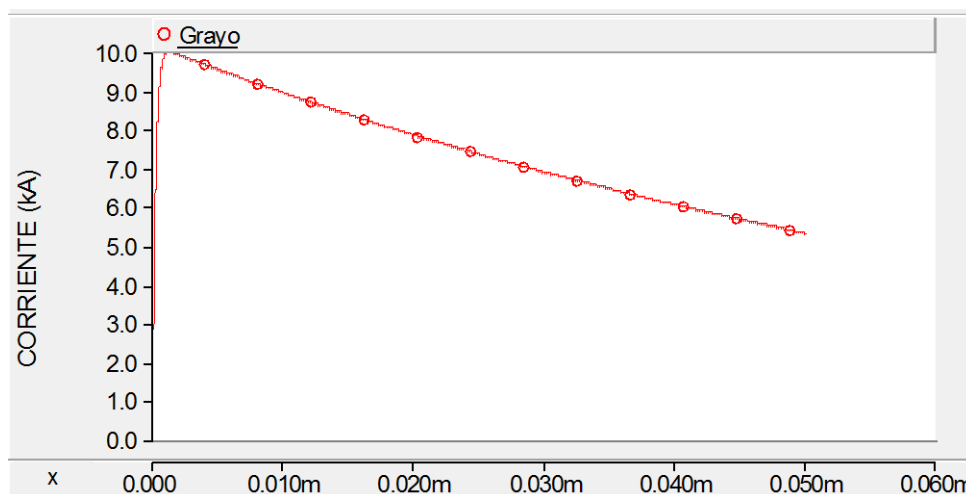
dependiente que se conecta donde se requiera indicar la descarga atmosférica. Se le colocó una función delay de 0,025 segundos para observar de mejor manera la incidencia de la descarga una vez estando ya la línea energizada.

A continuación se muestra el circuito de generación de onda de impulso de 1.2/50 μ s corriente pico de 10 kA, implementado en PSCAD para las simulaciones.



Fuente: Propia.

Figura N° 29: Modelamiento de impulso tipo rayo –PSCAD

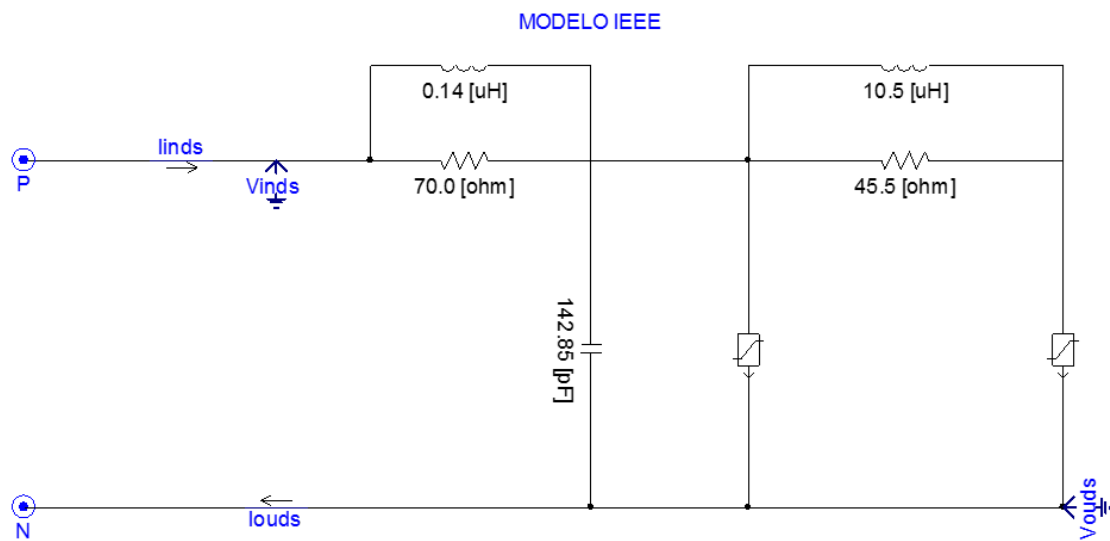


Fuente: Propia.

Figura N° 30: Forma de onda de la corriente de rayo (10kA) en PSCAD.

6.5. PARARRAYOS O DESCARGADORES DE Tensión

Estos son basados en el modelo desarrollado por el IEEE, el modelo propuesto contiene dos resistencias no lineales A0 y A1, una inductancia L1 para representar el campo magnético en la vecindad del pararrayos, una capacitancia C0 inherente a la longitud del pararrayos y una resistencia en paralelo R0



Fuente: Propia.

Figura N° 31: Modelo del descargador de tension utilizado para la simulación.

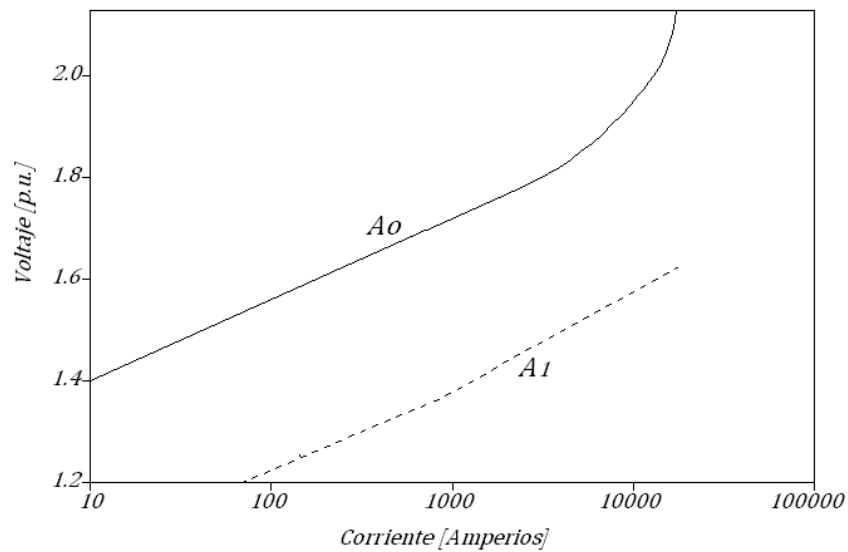


Figura N° 32: Característica de V-I en p.u. para las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1.

El primer paso para el cálculo de los parámetros de este modelo es obtener las características no lineales V-I del descargador de tensión para luego proceder a ajustar los modelos A0 y A1.

6.5.1. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA SIMULAR AL DESCARGADOR

d = longitud del descargador en metros.

n = número de columnas de varistores.

V_{10} = voltaje residual en kV para 10 kA, cuando se le aplica un impulso de corriente de $8/20 \mu s$.

V_{ss} = voltaje de descarga tipo maniobra para una onda de corriente tipo maniobra asociada

Considerando un Ur del pararrayo es de 39 kV, se tiene que la altura es de 620 mm \approx 0.7m

$$L_1 = 15 \times \frac{d}{n} = 15 \times \frac{0.7}{1} = 10.5 \mu H$$

$$R_1 = 65 \times \frac{d}{n} = 65 \times \frac{0.7}{1} = 45.5 \Omega$$

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} = 0.2 \frac{0.7}{1} = 0.14 \mu H$$

$$R_0 = 100 \times \frac{d}{n} = 100 \times \frac{0.7}{1} = 70.0 \Omega$$

$$C = 100 \frac{n}{d} = 100 \frac{1}{0.7} = 142.857 \mu F$$

Resistencias no lineales A0 y A1

Para encontrar cada uno de los puntos de las características V-I de las resistencias no lineales A0 y A1 se emplean las siguientes ecuaciones:

$$A_0 = [I * R_{relativo_en_p.u.\ para A_0}(i) * V_{10/1.6}]$$

$$A_1 = [I * R_{relativo_en_p.u.\ para A_1}(i) * V_{10/1.6}]$$

En donde los I*R relativos en p.u. para A0 y A1 pueden ser estimados de las curvas por unidad de la Figura 32. De esta manera se calcula el voltaje del descargador para cada punto de corriente de la resistencia no lineal buscada.

6.5.1.1. Curva característica V-I de la resistencia no lineal

Del rating del pararrayos $U_{r1}=39\text{kV}$ y entonces las sobretensiones desde que actuaran son

$$\text{TOV1}=39 \times 1.4 \times 1.73=94.45\text{kV}$$

Característica V-I para A0			Característica V-I para A1		
I [A]	V [p.u.]	V para A0 [V]	I [A]	V [p.u.]	V para A1 [V]
10	1.4	94.45			
100	1.54	103.88	100	1.23	82.99
1 000	1.68	113.34	1 000	1.36	91.76
2 000	1.74	117.38	2 000	1.43	96.48
4 000	1.8	121.42	4 000	1.48	99.86
6 000	1.82	122.77	6 000	1.5	101.21
8 000	1.87	126.15	8 000	1.53	103.23
10 000	1.9	128.17	10 000	1.55	104.58
12 000	1.93	130.19	12 000	1.56	105.25
14 000	1.97	132.89	14 000	1.58	106.60
16 000	2	134.92	16 000	1.59	107.28
18 000	2.05	138.29	18 000	1.6	107.95
20 000	2.1	141.66	20 000	1.61	108.63

Fuente: Propia.

Tabla 17: Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 50 kV.

6.6. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La resistencia de puesta a tierra se representa de forma estática con un elemento resistor, pero su valor frente a ondas de frente rápido es dinámico y varía de acuerdo a la intensidad de la corriente del rayo, para esto se calcula la resistencia de puesta a tierra para cada valor de simulación de corriente del rayo, en este caso se realizó para corrientes de 1, 10 y 20 kA de magnitud.

La resistencia de puesta a tierra frente a impulsos de rayos es menor que la resistencia de puesta a tierra medida o calculada para condiciones nominales de operación del sistema eléctrico. Para determinar la resistencia de puesta a tierra frente a impulsos de frente de onda rápido se utilizó el modelo de resistencia a la base del apoyo, y su ecuación es la siguiente:

$$R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}}$$

Donde:

R_t : Resistencia de puesta a tierra a la base (Ω).

R_0 : Resistencia de puesta a tierra a frecuencia de operación (Ω). =15 ohm

I_R : Corriente del rayo (kA).

I_g : Corriente a la cual se produce la ionización (kA).

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{E_0 \times \rho_o}{R_0^2} \right)$$

Donde:

ρ_o : Resistividad del terreno (Ω/m).

Promediando los datos de campo = 45.9Ω .

E_0 : Ionización de nuestro del suelo (cerca de 300 kV/m).

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{300 \times 45.9}{15^2} \right) = 9.740 \text{ kA}$$

Resistencia para una descarga de 1 kA .

$$R_t = \frac{15}{\sqrt{1 + \frac{1}{9.74}}} = 14.28 \Omega$$

Resistencia para una descarga de 10 kA .

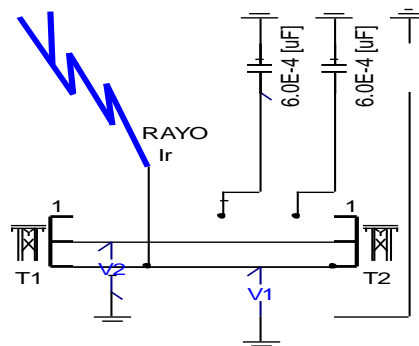
$$R_t = \frac{15}{\sqrt{1 + \frac{10}{9.74}}} = 10.53 \Omega$$

Resistencia para una descarga de 20 kA .

$$R_t = \frac{15}{\sqrt{1 + \frac{20}{9.74}}} = 8.58 \Omega$$

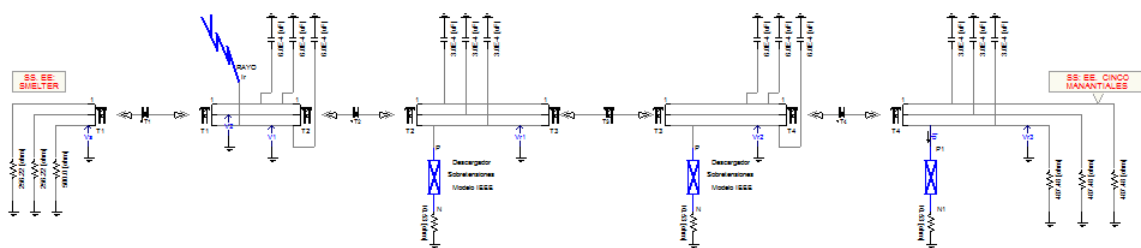
6.7. MODELOS DE SIMULACIÓN UTILIZADOS EN EL PSCAD

A continuación se muestran los modelos que se usaron para representar la línea aérea de alimentación y poder determinar los valores de las sobretensiones por descargas atmosféricas.



Fuente: Propia.

Figura N° 33: Modelo de la incidencia del rayo en la línea de 50 kV.



Fuente: Propia.

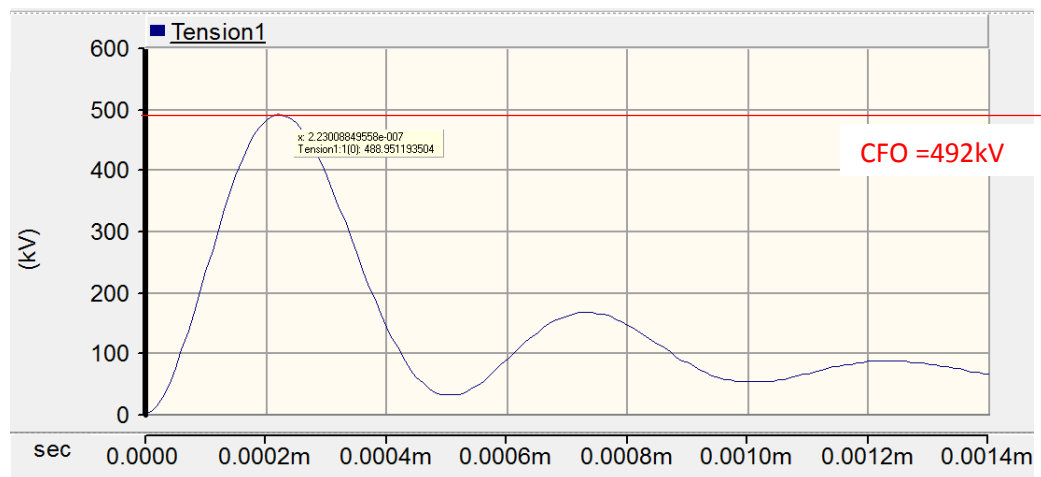
Figura N° 34: Modelamiento de la línea de 50 Kv, con implementación de pararrayos.

6.8. ESCENARIOS CONSIDERADOS PARA LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Existen tres escenarios con el software PSCAD para la simulación de incidencias de descargas atmosféricas en la línea, en ellos se contempla la descarga en el cable de guarda, en los apoyos y en el conductor de fase.

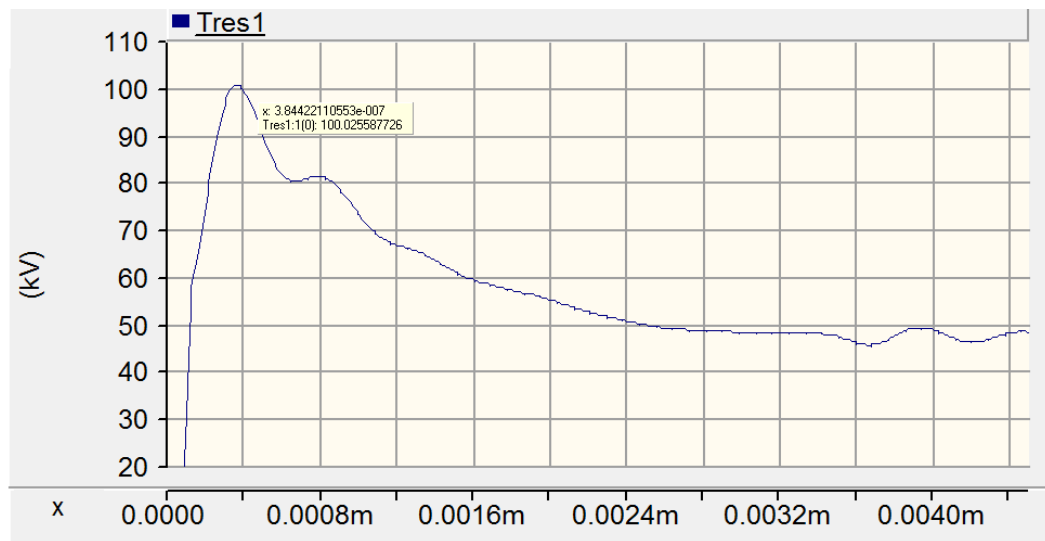
6.8.1. RESULTADOS DE LA INCIDENCIA DEL RAYO EN EL CONDUCTOR

Para una corriente de descarga atmosférica de 10 kA tenemos:



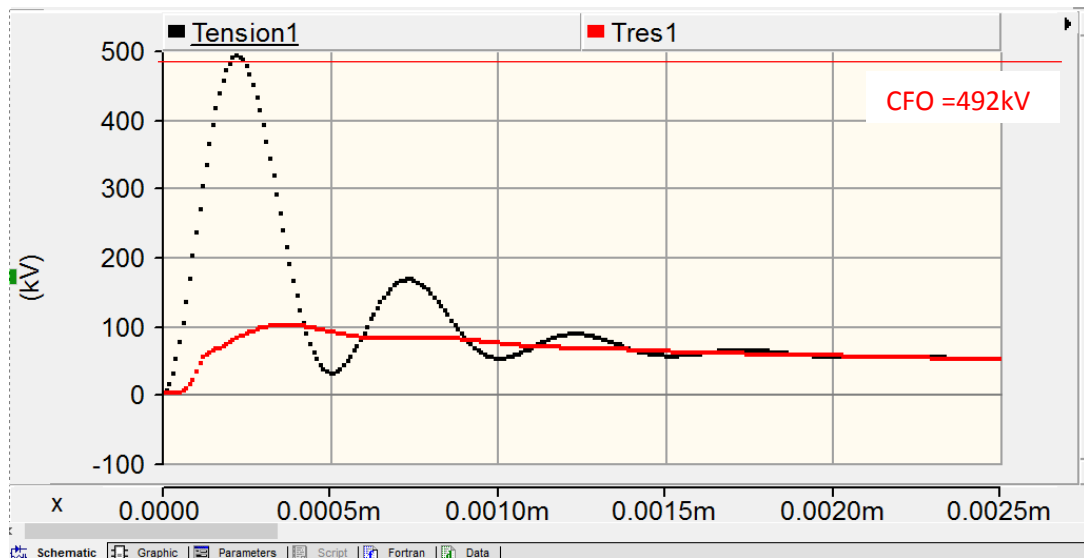
Fuente: Propia.

Figura N° 35: Voltaje en la línea a una Δt de 0,0002 μ s. (488.95 kV)



Fuente: Propia.

Figura N° 36: Voltaje residual del primer pararrayo (100 kV).

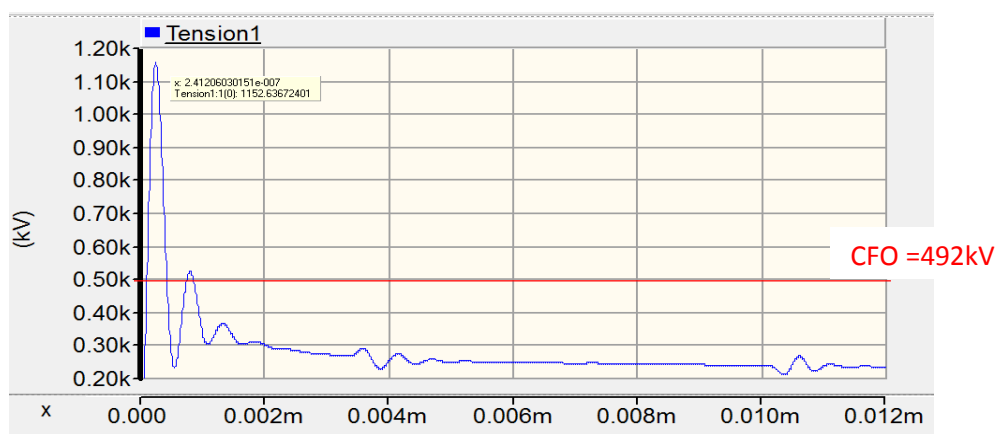


Fuente: Propia.

Figura N° 37: Comparación entre el voltaje de la línea y la sobretensión por descarga atmosférica.

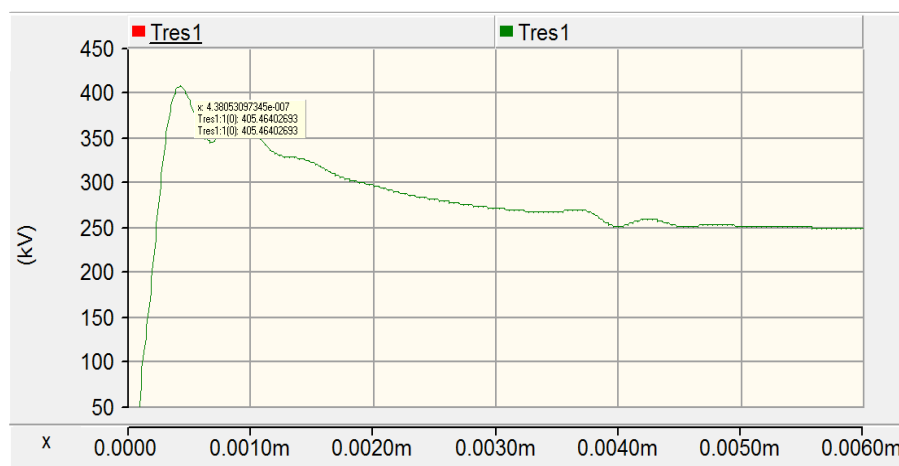
Para una corriente de descarga de 10 kA aplicada en el conductor, la sobretensión toma un valor de 598 kV y supera el CFO normalizado de los aisladores (492 kV). El voltaje en los terminales del pararrayos supera el voltaje de cebado y comienza a drenar la descarga a tierra.

Para una corriente de descarga atmosférica de 20 kA tenemos:



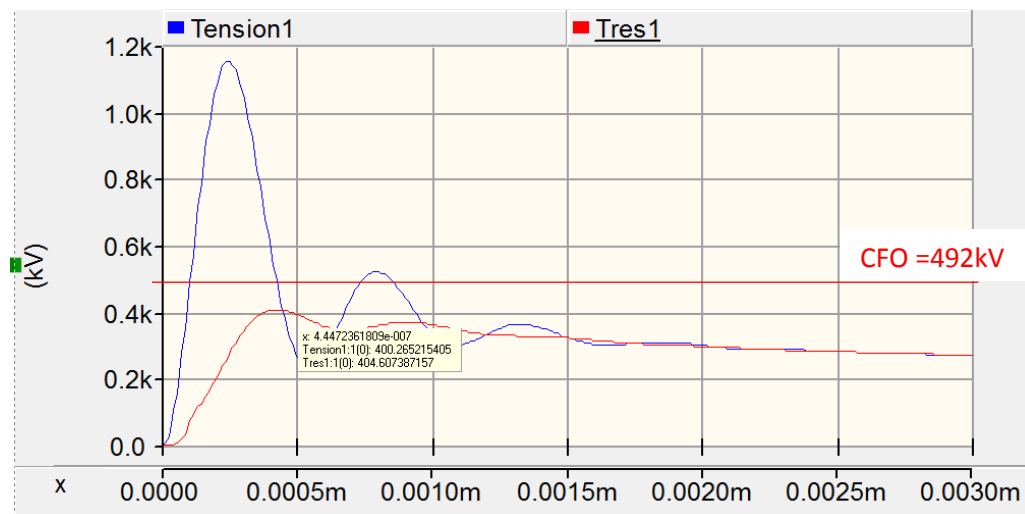
Fuente: Propia.

Figura N° 38: Voltaje línea tierra a un Δt de 0,2 μ s. (1152 kV).



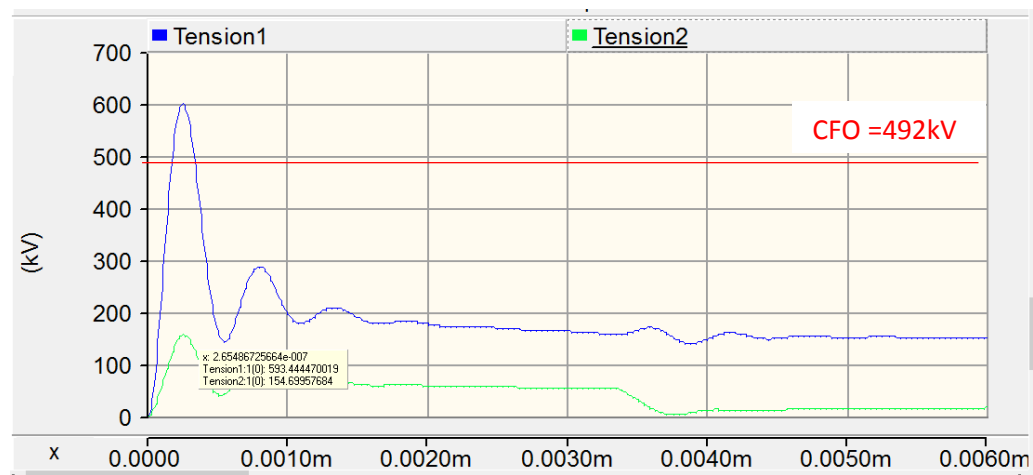
Fuente: Propia.

Figura N° 39: Voltaje después del 1er pararrayo. (405 kV).



Fuente: Propia.

Figura N° 40: comparación de voltaje con y sin pararrayos.



Fuente: Propia.

Figura N° 41: Sobretensión inducida en la segunda fase (154.7 kV).

Para una corriente de descarga de 20 kA aplicada en el conductor, la sobretensión toma un valor de 1 280 kV superando el CFO normalizado y el nuevo CFO requerido. El voltaje

en los terminales del pararrayos supera el voltaje de cebado y comienza a drenar la descarga a tierra, pero la velocidad de la onda de la descarga atmosférica (300 000 km/s) en 1,2 μ s de duración del pico de la misma realiza un recorrido de 360 metros en la línea.

6.9. CUADRO COMPARATIVO

Cuadro comparativo de la producción de mineral y el costo de pérdida en el tiempo de interrupción de la energía eléctrica.

EL BROCAL			
	PRODUCCION DIARIA (TM)	COSTO X Libra (USD) COBRE	COSTO TOSTAL
DIA	7 000	2.89	9 176 125.70
HORA	291.6666667		382 338.57
MINUTO	4.861111111		6 372.31

Fuente: http://www.elbrocal.pe/facipub/upload/cont/1679/files/reporte_ejecutivo_2014_s_m_el_brocal_web.pdf

Tabla 18: Cuadro comparativo de producción vs costo total

6.10. CARACTERÍSTICAS DEL PARARRAYO A INSTALARSE

Los pararrayos a ser instalados en la línea deberán tener las siguientes características técnicas:

Descripción	Unidad	Valor
Tensión Máxima de la Red	kV	52.5
Tensión Nominal del Pararrayo	kV	37.88
Tensión Máxima de Operación Continua (Uc o MCOV)	kV	30.31
TOV (10s) fase - fase	kV	40.91
Voltaje residual máxima con onda de corriente 30/60us	kV	74.4
Voltaje residual máxima con onda de corriente 8/20us	kV	95.9
Corriente de Descarga	kA	10
Capacidad de Disipación Mínima de Energía	kJ/kV	11.49
Clase de Descarga	-	3
Nivel Básico de Aislamiento (BIL)	kV	325

Fuente: Propia.

Tabla 19: Descripción de las características del pararrayos.

NOTA: El cuadro anterior, es el resumen de los cálculos realizados para la instalación de los pararrayos a fin de mitigar los efectos producidos por las sobretensiones de origen atmosférico. Ver Anexo 05

CONCLUSIONES

1. El cable de guarda apantalla perfectamente a las líneas para intensidades de rayo superiores a 4 kA, es decir estos rayos de caer dentro de la zona de atracción del cable de guarda, incidirán sobre el cable de guarda y no sobre los conductores.
2. El nivel básico de aislamiento para impulso tipo rayo (10 kA) de acuerdo a la IEC 60071-1, es de 325 kV como mínimo para la línea de transmisión de 50 kV, y de acuerdo a los cálculos realizados para la altura determinada, es el adecuado.
3. De acuerdo al numeral 5.2 se demostró que los rayos con mayor probabilidad de incidencia son los que poseen intensidades de entre 16 y 25 kA (se toma el rayo con intensidad de corriente de 20 kA como el tipo más común), analizando esto con la distancia a partir de la cual este tipo de descarga no supondrá una sobretensión inducida que afecte a la línea, se obtiene la distancia significativa de aproximadamente 120 m.
4. La utilización de los modelos de pararrayo tienen como punto de partida los datos de los fabricantes, dichos datos deben ser: longitud del descargador, número de columnas de varistores, máximo voltaje de descarga para 20 kA cuando se le aplica un impulso de corriente de 8/20 μ s y voltaje de descarga tipo maniobra para una onda de corriente de 30/60 μ s.

5. La incidencia de rayos directamente sobre el conductor de guarda generarán una elevada tensión en el mismo; dado por la multiplicación de la corriente de rayo y la impedancia característica del cable de guarda. Esta descarga solamente tendrá una forma de liberarse a través de las bajadas hacia la puesta a tierra, sin embargo se puede notar en los datos tomados de campo que algunos de estos poseen valores elevados de resistencia de puesta a tierra.
6. La línea de transmisión de 50 kV, SS. EE. Smelter- Cinco Manantiales, sólo poseen descargadores de tensión (más conocidos como pararrayos) en los puntos extremos de la línea (Sub Estaciones), lo que impide que se descargue adecuadamente las sobretensiones (ya que se trata de líneas medianamente cortas de entre 7-8 km).
7. Las crucetas utilizadas en las estructuras poseen un CFO igual a cero debido a que son de material metálico, lo cual no aporta en incrementar el CFO del punto evaluado.
8. De acuerdo al cuadro comparativo producción vs pérdidas ante una eventual falla en el sistema eléctrico, las pérdidas económicas son significativamente elevadas.

RECOMENDACIONES

Para reducir el número de salidas de la línea de 50 kV del presente Estudio, se recomienda:

1. Se recomienda realizar el mantenimiento periódico del cable de guarda en el respectivo tramo, para la seguridad de la instalación.
2. Para corrientes de descarga mayores a 10 kA, es recomendable realizar la instalación de descargadores de sobre voltajes de alta tension, para garantizar la operatividad, confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico, como de los equipos.
3. Para dar seguridad a la instalación se recomienda la instalación de descargadores de sobre tension en todas las fases.
4. De acuerdo a la demostración con el software utilizado (PSCAD), se recomienda ingresar todos los datos que dicho programa solicitada para realizar una adecuada simulación.
5. Se recomienda realizar el mantenimiento y/o tratamiento de los Sistemas de puesta a tierra para reducir los valores de la misma, haciendo uso de componentes químicos por la elevada resistividad y encontrarse en zona rocosa.

6. Cuando una descarga atmosférica incide en la estructura, los componentes tienden a deteriorarse, por lo que es necesario realizar la inspección correspondiente en todo el recorrido de la línea. Debido a que los aisladores se quiebran o se rompen en los bordes. Ante esto es recomendable realizar el cambio de la cadena de aisladores porque se reduce la distancia de aislamiento.
7. En los postes de madera, se recomienda el cambio de las crucetas metálicas a las de madera, para incrementar el CFO en 25 kV/m.
8. Si se requiere incrementar el CFO de las estructuras, solo se consigue incrementando la cantidad de aisladores instalados, debido a que algunas estructuras son metálicas
9. Para evitar que las pérdidas económicas sean tan significativas es recomendable realizar la instalación de los descargadores de sobre tensión. en todas las fases del sistema trifásico y aplicados en el mismo poste para reducir la tasa de flameo debidos a impactos directos o sobretensiones inducidas. El espaciamiento entre descargadores no debe ser mayor de dos vanos de postes debido a la elevada tasa de tiempo de crecimiento tensión de descargas directas o inducidas.

ANEXOS

ANEXO 01

TABULACION DE LA DENSIDAD DEPROBABILIDAD DE CORRIENTE PICO

I (kA)	P(I)
1	0.0000007032672
2	0.0000526683973
3	0.0003882211428
4	0.0012650699829
5	0.0027635730131
6	0.0047945841625
7	0.0071845840693
8	0.0097457146514
9	0.0123139094020
10	0.0147632157131
11	0.0170067269117
12	0.0189914183650
13	0.0206910479544
14	0.0220991812473
15	0.0232231968381
16	0.0240795032510
17	0.0246899086005
18	0.0250789715527
19	0.0252721371875
20	0.0252944755768
21	0.0251698693773
22	0.0249205275677
23	0.0245667304695
24	0.0241267346250
25	0.0236167848016
26	0.0230511948602
27	0.0224424701773
28	0.0218014524703
29	0.0211374738730
30	0.0204585114619
31	0.0197713365575
32	0.0190816553401
33	0.0183942388639
34	0.0177130416158
35	0.0170413084751
36	0.0163816703911
37	0.0157362293825
38	0.0151066336191
39	0.0144941434278
40	0.0138996890814
41	0.0133239212116
42	0.0127672546470

43	0.0122299064232
44	0.0117119286501
45	0.0112132368583
46	0.0107336343861
47	0.0102728333063
48	0.0098304723373
49	0.0094061321334
50	0.0089993482984
51	0.0086096224295
52	0.0082364314551
53	0.0078792355018
54	0.0075374844923
55	0.0072106236518
56	0.0068980980760
57	0.0065993564948
58	0.0063138543467
59	0.0060410562652
60	0.0057804380621
61	0.0055314882850
62	0.0052937094116
63	0.0050666187378
64	0.0048497490070
65	0.0046426488228
66	0.0044448828794
67	0.0042560320418
68	0.0040756933005
69	0.0039034796238
70	0.0037390197273
71	0.0035819577759
72	0.0034319530330
73	0.0032886794684
74	0.0031518253351
75	0.0030210927234
76	0.0028961970987
77	0.0027768668310
78	0.0026628427180
79	0.0025538775090
80	0.0024497354310
81	0.0023501917205
82	0.0022550321632
83	0.0021640526434
84	0.0020770587044
85	0.0019938651212
86	0.0019142954857
87	0.0018381818062

ANEXO 02

88	0.0017653641202	133	0.0003329369900
89	0.0016956901216	134	0.0003218130400
90	0.0016290148018	135	0.0003110985028
91	0.0015652001054	136	0.0003007769422
92	0.0015041146000	137	0.0002908326347
93	0.0014456331591	138	0.0002812505366
94	0.0013896366592	139	0.0002720162525
95	0.0013360116901	140	0.0002631160053
96	0.0012846502783	141	0.0002545366079
97	0.0012354496221	142	0.0002462654362
98	0.0011883118396	143	0.0002382904032
99	0.0011431437287	144	0.0002305999347
100	0.0010998565372	145	0.0002231829456
101	0.0010583657448	146	0.0002160288183
102	0.0010185908555	147	0.0002091273811
103	0.0009804551993	148	0.0002024688884
104	0.0009438857441	149	0.0001960440014
105	0.0009088129170	150	0.0001898437697
106	0.0008751704336	151	0.0001838596146
107	0.0008428951362	152	0.0001780833118
108	0.0008119268402	153	0.0001725069761
109	0.0007822081876	154	0.0001671230463
110	0.0007536845083	155	0.0001619242707
111	0.0007263036879	156	0.0001569036939
112	0.0007000160424	157	0.0001520546434
113	0.0006747741993	158	0.0001473707175
114	0.0006505329839	159	0.0001428457734
115	0.0006272493127	160	0.0001384739157
116	0.0006048820905	161	0.0001342494862
117	0.0005833921142	162	0.0001301670531
118	0.0005627419804	163	0.0001262214018
119	0.0005428959982	164	0.0001224075250
120	0.0005238201060	165	0.0001187206143
121	0.0005054817929	166	0.0001151560513
122	0.0004878500237	167	0.0001117093998
123	0.0004708951681	168	0.0001083763983
124	0.0004545889329	169	0.0001051529517
125	0.0004389042979	170	0.0001020351255
126	0.0004238154551	171	0.0000990191379
127	0.0004092977510	172	0.0000961013543
128	0.0003953276312	173	0.0000932782807
129	0.0003818825887	174	0.0000905465577
130	0.0003689411139	175	0.0000879029554
131	0.0003564826477	176	0.0000853443677
132	0.0003444875366	177	0.0000828678070

178	0.0000804704000
179	0.0000781493821
180	0.0000759020939
181	0.0000737259760
182	0.0000716185657
183	0.0000695774926
184	0.0000676004750
185	0.0000656853163
186	0.0000638299018
187	0.0000620321950
188	0.0000602902349
189	0.0000586021326
190	0.0000569660688
191	0.0000553802908
192	0.0000538431100
193	0.0000523528992
194	0.0000509080905
195	0.0000495071726
196	0.0000481486888
197	0.0000468312350
198	0.0000455534574
199	0.0000443140506
200	0.0000431117560

ANEXO 03

CÁLCULO DE PARARRAYOS EN 50 kV

1. Máxima Tensión de Operación Continua (MCOV)

$$\text{Para 50 kV: } MCOV \geq 1.00 \times \frac{1.05 \times 50}{\sqrt{3}} = 30.31 \text{ kV}$$

2. Sobretensión Temporal (TOV)

$$\text{Para 50 kV : } TOV \geq 1.35 \times 30.31 = 40.91 \text{ kV}$$

3. Tensión Nominal del Pararrayos (U_r)

La tensión nominal del pararrayos U_r , es el mayor valor entre U_{r1} y U_{r2} .

a. Utilizando la Tensión de Operación Continua MCOV (U_c)

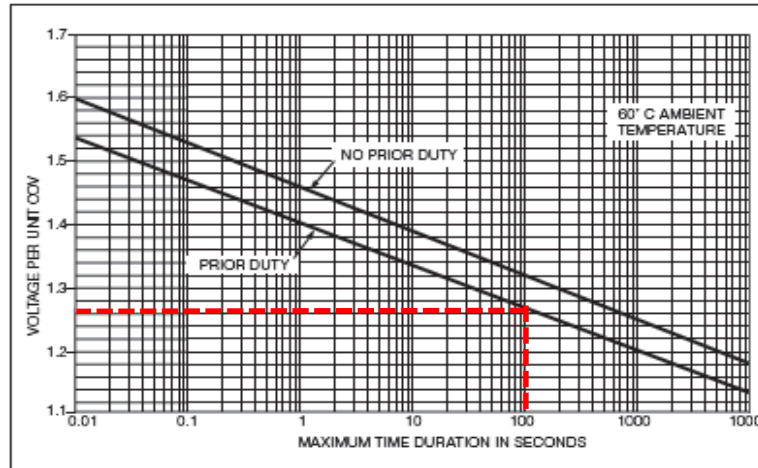
$$U_{r1} = \frac{1}{k_o} \times MCOV$$

$k_o = 0.8$ factor de diseño del pararrayos usualmente ($1/k_o = 1.25$)

$$\text{Para 50 kV : } U_{r1} \geq 1.25 \times 30.31 = 37.88 \text{ kV}$$

b. Utilizando la Sobretensión Temporal (TOV)

$$U_{r2} = \frac{1}{k_t} \times TOV$$



Característica Tensión AC – Tiempo (TOV)

Para obtener el factor k_t , se utilizará el gráfico anterior:

Se tomara en consideración para este caso particular un tiempo de sobretensión máxima de 100s.

t = 100s, tenemos que el K_{TOV} correspondiente es 1.27

$$\text{Para } 50 \text{ kV} : U_{r2} = \frac{1}{1.27} \times 40.91 = 32.21 \text{ kV}$$

Por lo tanto la tensión nominal final del pararrayos U_r , adoptado será el mayor de los dos valores U_{r1} y U_{r2} , redondeado al número entero inmediato superior divisible por tres.

$$U_r = \max\{U_{r1}, U_{r2}\}$$

Parámetros	Nivel de Tensión 50 kV
U_{r1}	37.88
U_{r2}	32.21
U_r	37.88

OK

4. Cálculo de la Clase de Descarga

Para este caso utilizaremos la expresión de cierre y re-cierre, ya que representa la maniobra que más índice de acción que se tiene en la zona.

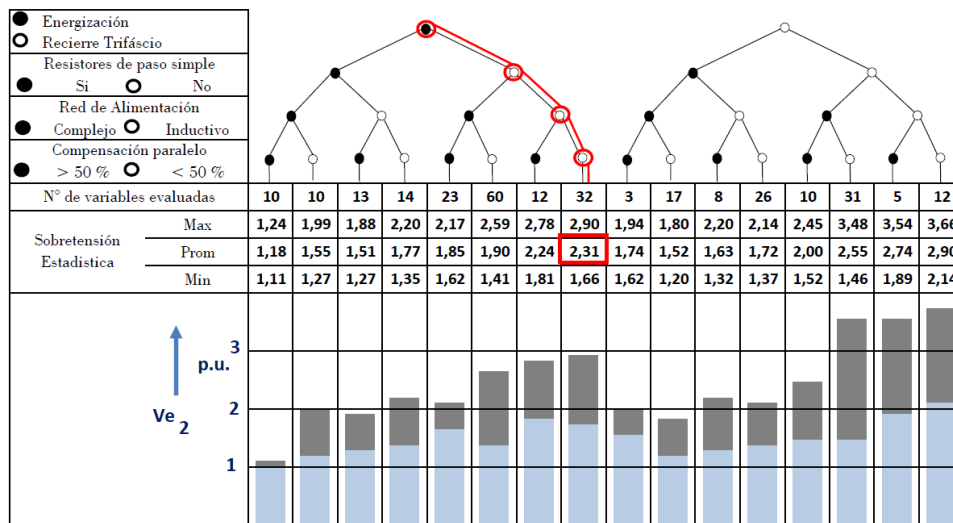
Ups: En este caso tomaremos el dato de tabla de tabla de Catalogo.

TABLE 4
Protective Characteristics of the UltraSIL Polymer-Housed VariSTAR U3 Surge Arrester

Arrester Rating U_r (kV, rms)	Arrester COV U_c (kV, rms)	Steep Current Residual Voltage (kV Crest)	Lightning Impulse Residual Voltage (kV Crest) 8/20 μ s Current Wave						Switching Impulse Residual Voltage (kV Crest) 30/60 Current Wave			
			1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	125 A	250 A	500 A	1000 A
3	2.55	8.8	6.7	7.0	7.3	7.9	8.8	10.1	5.9	6.0	6.2	6.4
6	5.10	17.0	13.3	14.0	14.6	15.6	17.3	19.6	11.7	12.0	12.4	12.9
9	7.65	25.3	19.9	21.0	21.8	23.4	25.8	29.1	17.6	18.1	18.6	19.3
10	8.40	27.8	21.9	23.0	23.9	25.7	28.3	31.9	19.4	19.8	20.4	21.2
12	10.2	33.6	26.6	28.0	29.0	31.1	34.3	38.6	23.5	24.1	24.8	25.7
15	12.7	41.8	33.1	34.8	36.2	38.7	42.7	47.9	29.3	30.0	30.9	32.0
18	15.3	50.2	39.9	41.9	43.5	46.6	51.4	57.6	35.3	36.1	37.2	38.5
21	17.0	55.8	44.3	46.6	48.4	51.8	57.0	63.9	39.2	40.2	41.3	42.8
24	19.5	63.9	50.8	53.5	55.5	59.4	65.4	73.2	44.9	46.1	47.4	49.1
27	22.0	72.0	57.3	60.3	62.6	67.0	73.7	82.5	50.7	52.0	53.4	55.4
30	24.4	79.9	63.6	66.9	69.4	74.3	81.8	91.4	56.2	57.6	59.3	61.4
33	27.5	89.9	71.7	75.4	78.2	83.7	92.1	103	63.4	65.0	66.8	69.2
36	29.0	94.8	75.6	79.5	82.5	88.3	97.1	109	66.8	68.3	70.4	73.0
39	31.5	103	82.1	86.3	89.6	95.9	106	118	72.6	74.4	76.5	79.3
42	34.0	112	88.6	93.2	96.7	104	114	127	78.3	80.3	82.6	85.6

$$U_{ps} = 74.4 \text{ kV}$$

Ve: La amplitud de la sobretensión de maniobra, en este caso tomaremos:



Por lo tanto el V_{e2} promedio = 2.31

$$Ve = Ub_{xpu} = 42.8 \times 2.31 = 98.86 kV$$

Z: La impedancia característica según tabla será de 450kV

Tw: El tiempo de propagación será tomando el mayor tramo de longitud de pararrayo a pararrayo, que en este caso es 7km y una velocidad de propagación de 3km/μs.

$$Tw = \frac{7km}{0.3 \frac{km}{\mu s}} = 23.33 \mu s$$

Quedando:

$$W = \frac{2(74.4)(99.09 - 74.4) \times 23.33 \times 3}{450} = 574.4 kJ$$

$$W' = \frac{574.4 kJ}{50 kV} = 11.49 \frac{kJ}{kV}$$

Clase	Energía Específica
1	6 kJ/kV
2	11 kJ/kV
3	16 kJ/kV

La clase correspondiente para un pararrayos para el sistema de 50 kV es CLASE 3.

5. Aislamiento de pararrayos

Nivel de aislamiento al impulso tipo rayo ($LIWL_{peak}$)

$$LIWL_{peak} = 1.15 \times U_{pl} \times e^{m(H / 8150)}$$

$$LIWL_p = 1.15 \times 95.9 \times 1.73 = 190.79 kV$$

Nivel de aislamiento a frecuencia industrial ($PFWL_{r.m.s.}$)

$$PFWL = 1.10 \times U_{ps} \times e^{m(H / 8150)} \times 0.6^{[e]}$$

$$PFWL = 1.15 \times 74.4 \times 1.73 \times 0.6 = 88.81 kV$$

5.1. Distancia de protección de pararrayos

$$U_e = U_p + \frac{2 \times S \times (a + b)}{V} \quad V = 300 m / \mu s$$

La experiencia demuestra que un factor de seguridad de 1.2 es suficiente entre el BIL del equipo eléctrico y la sobretensión debida al rayo en el equipo eléctrico.

$$\frac{BIL}{1.2} \approx U_e = U_p + \frac{2 \times S \times (a + b)}{V}$$

Si el valor límite se establece en $L = a+b$, entonces la ecuación a utilizar queda como sigue:

$$L = \frac{V}{2 \times S} \times \left[\frac{BIL}{1.2} - U_p \right]$$

Entonces la distancia máxima de protección de pararrayos es:

$$L = \frac{V}{2 \times S} \times \left[\frac{BIL}{1.2} - U_p \right]$$

Los pararrayos a instalarse tienen las siguientes características:

Ur: 39kV

Ups: 74.4kV

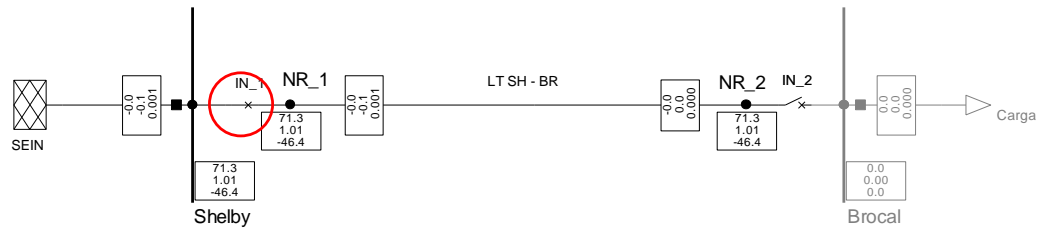
Upl: 95.5kV

Distancia Máxima de Protección Lmax del Pararrayos es:

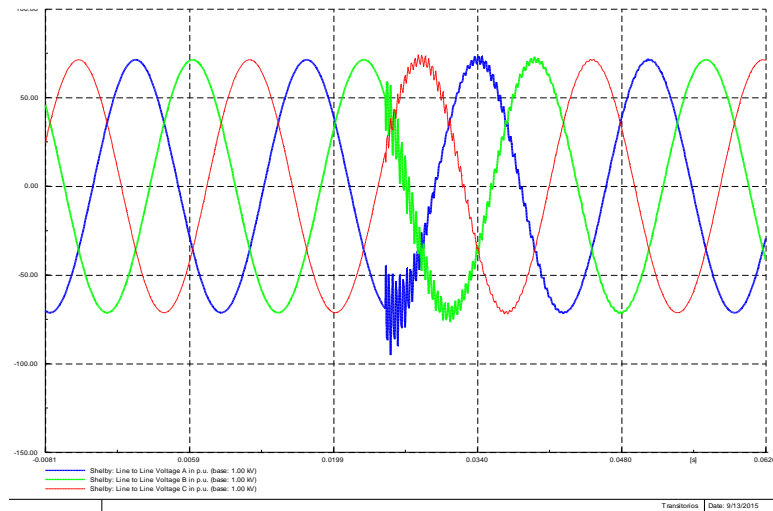
$$L_{\max} = \frac{300\mu s}{2 \times 1000\mu s} \times \left[\frac{325kV}{1.2} - 95.5kV \right] = 26.3m$$

6. Modelamiento de sobretensiones transitorias del tipo maniobra con y sin atenuación de pararrayos (DIGsilent)

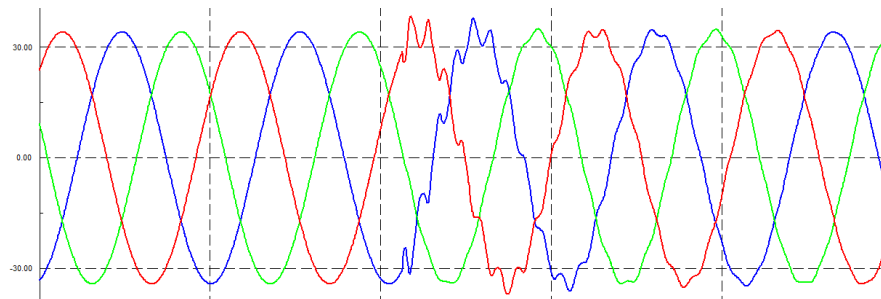
Modelo de la línea de 50 kV



Sobretensión del tipo maniobra Sin Pararrayos



Sobretensión del tipo maniobra Con Pararrayos

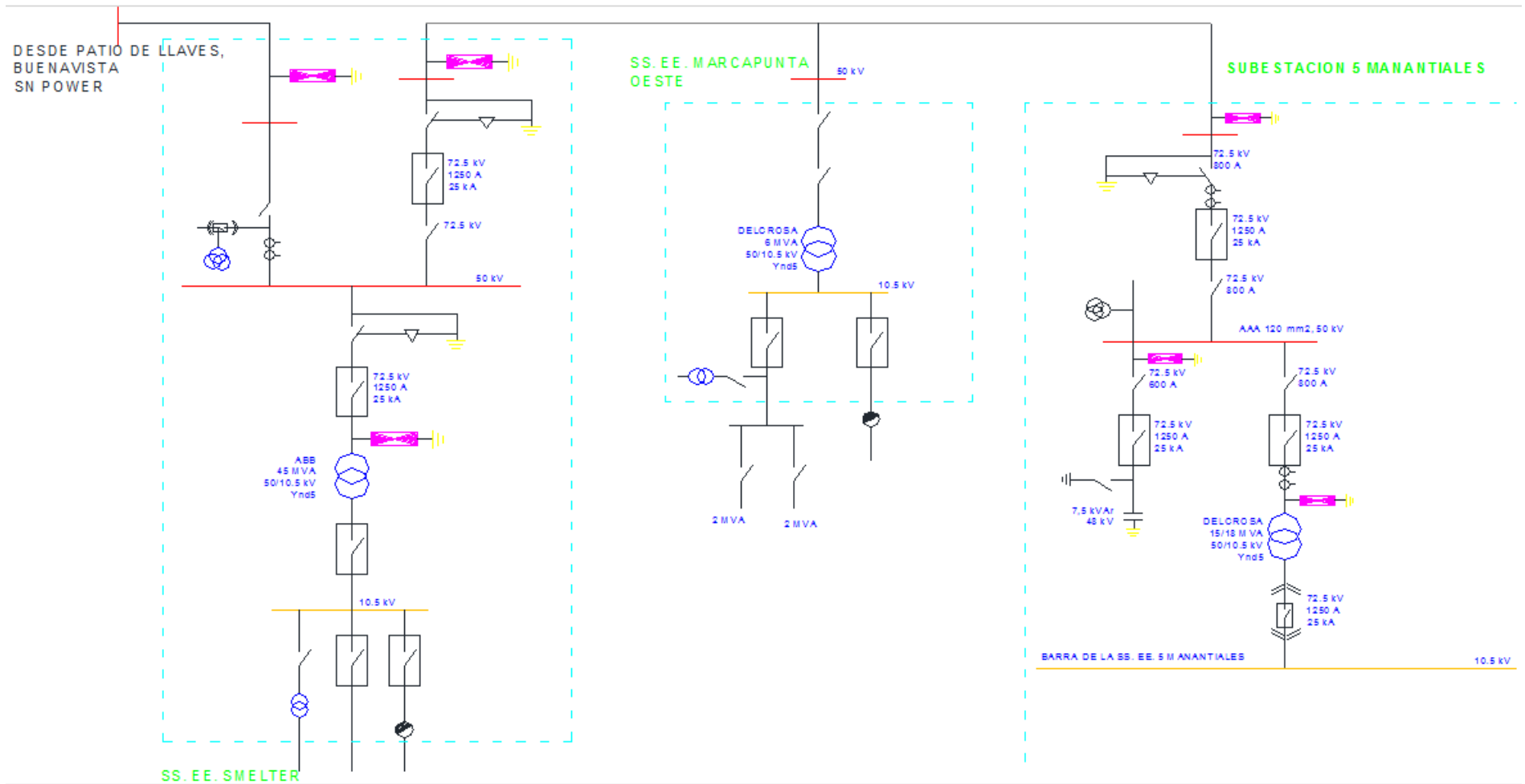


ANEXO 04

DATOS OBTENIDOS EN CAMPO PARA LA LINEA DE TRANSMISION 50 kV (SS. EE. SMELTER – SS. EE. CINCO MANANTIALES)

N° de Estruct.	Tipo de Estruct.	Aislador	PAT	Tipo PAT	R. de PAT(Ω)	Cable de Guarda	Dist. Cond. Más cercano(m)	Pararrayo	baja a PAT	ρ (1m entre varillas) (Ω -m)	ρ (2m entre varillas) (Ω -m)	ρ (3m entre varillas) (Ω -m)	ρ (4m entre varillas) (Ω -m)
2	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	10.8	Simple	2	No	Si	70.2	28.8	13.5	6.4
4	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	7.56	Simple	2	No	Si	14.7	8.15	4.45	3.54
5	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	13.1	Simple	2	No	Si	28.3	15.1	16.1	17
7	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	8.4	Simple	2	No	Si	28	12.9	7.6	6.1
8	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	20.3	Simple	2	No	Si	64.7	41.4	27.2	19.1
9	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	18.2	Simple	2	No	Si	158.8	69.9	41.6	24.1
18	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	13.3	Simple	2	No	Si	12.8	8.03	8.44	7.16
22	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso	No	Simple	2	No	No	13.9	6	2.7	1.9
Ultima	Torre	Suspensión	Simple	Contrapeso		Simple	2	No	No	22	5.62	4.12	2.39

ANEXO 05: DIAGRAMA UNIFILAR DE LA RED ELÉCTRICA.



ANEXO 06

DATOS TÉCNICOS DEL PARARRAYO EMPLEADO PARA LA SIMULACION

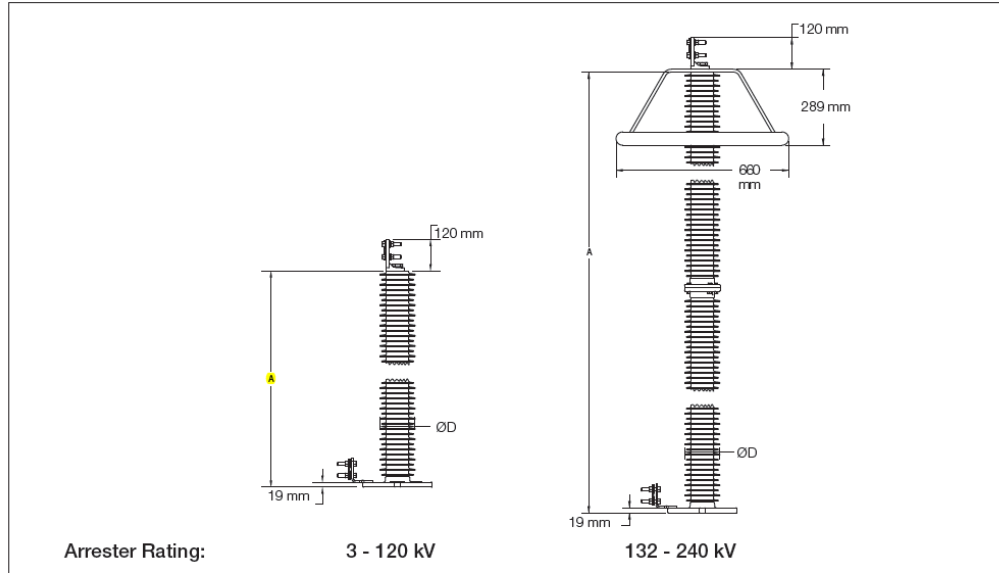


Figure 8.
Outline drawing of Standard VariSTAR UltraSIL Polymer-Housed Type U3 Surge Arresters.

TABLE 5
Catalog Numbers and Dimensional Information and Weights for VariSTAR U3 Surge Arresters¹

Arrester Rating U_r (kV, rms)	Arrester COV U_c (kV, rms)	Standard Arrester Catalog Number	Dim. A (mm) (Fig. 8)	Dimension B Minimum Phase-to-Earth Clearance* (mm) (Fig. 4)	Dimension C Minimum Phase-to-Phase Clearance* (mm) (Fig. 4)	Dim. D (mm) (Fig. 8)	Housing Leakage Distance** (mm)	Arrester Mass (kg)
3	2.55	U30030020845AAA	207	95	171	121	478	6.3
6	5.10	U30060051045AAA	246	97	173	121	598	7.1
9	7.65	U30090071045AAA	246	106	183	121	598	7.3
10	8.40	U30100081045AAA	246	110	186	121	598	7.3
12	10.2	U30120101245AAA	285	121	197	121	718	8.1
15	12.7	U30150121445AAA	324	140	216	121	837	8.8
18	15.3	U30180151445AAA	324	163	239	121	837	9.0
21	17.0	U30210171645AAA	364	161	237	121	957	9.5
24	19.5	U30240191845AAA	403	183	259	121	1076	10.3
27	22.0	U30270221845AAA	403	205	282	121	1076	10.5
30	24.4	U30300242045AAA	442	227	303	121	1196	11.3
33	27.5	U30330272245AAA	481	255	331	121	1316	12.0
36	29.0	U30360292245AAA	481	268	345	121	1316	12.0
39	31.5	U30390312245AAA	481	291	367	121	1316	12.2
42	34.0	U30420342445AAA	520	315	391	121	1435	13.0
45	36.5	U30450362645AAA	559	335	411	121	1555	13.7
48	39.0	U30480392645AAA	559	359	435	121	1555	14.0
54	42.0	U30540422845AAA	598	385	462	121	1674	14.7
60	48.0	U30600483045AAA	637	438	515	121	1794	15.7
66	53.0	U30660534045AAA	838	483	559	121	2392	21.6

FOTOGRAFIAS



Imagen que muestra el valor de la resistencia de puesta a tierra en la Subestación Smelter.



Imagen de la estructura de la línea de 50 kV, SS. EE. Smelter – SS. EE. Cinco Manantiales.



Imagen del punto de alimentación en la línea 517 Shelby - Excelsior de 50 kV, en la cual no se aprecia la instalación de pararrayos.



*Imagen que muestra la derivación de la **línea 518**. Hacia las instalaciones de la Sociedad Minera el Brocal.*



Placa del pararrayos empleado en la SS. EE. Cinco Manantiales.

BIBLIOGRAFIA

- **Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión.**

Juan Antonio Martinez Velazco – 2007

- **Conferencia Internacional sobre Transitorios de potencia del sistema (IPAT'01)**

F. Fernández, R. Díaz, -Río de Janeiro, Brasil, 2001

- **Un modelo simplificado de pararrayos de óxido de zinc de sobretensiónIEEE
Trans. Power Delivery.**

P. Pinceti, M. Giannettoni- 1999

- **Estudios de aplicación de descargadores de línea en parcial blindado de 138 kV
líneas de transmisión,**

LC Zanetta, CE de M. Pereira.

- **Una mejora para la selección de los descargadores de sobretensión sobre la base
de la evaluación de la probabilidad de fallo.**

L. Montañés, M. García-Gracia, M. Sanz, MA García – 2002

- **Sobrecarga en la línea de selección pararrayos para mejorar el rendimiento de
las líneas de transmisión eléctrica.**

JA Tarchini, W. Gimenez – 2004,2005

- **EPRI AC Transmission Line Reference Book— 200 kV and Above, Third
Edition: The “Red Book”**

- **Análisis de sobretensiones debido a transitorios por maniobras en sistemas eléctricos de potencia mayores de 300 kV.**

Edgar Estuardo Chaj Ramírez – Abril del 2008

- **Coordinación de Aislamiento en Subestaciones**

Náthali Morales Mariño

- **Tesis “Simulación de la operación de apartarrayos en líneas de transmisiones utilizando el programa atp /emtp”.**

Isabel Lugo Nogueron

- **Características de las descargas atmosféricas y su efecto sobre las líneas de transmisión**

Ingeniero Antonio Mejía Umaña – Boletín técnico GAMMA CORONA

- **Catálogo - Descargadores de sobretensiones**

ABB, edición 5, 2005-10

- **IEEE Std 1410™-2004**

(Revision of IEEE Std 1410-1997), 12 julio 2004

- **Software PSCAD, versión 4.2**

SITIOS WEB

- http://www.elbrocal.pe/facipub/upload/cont/1679/files/reporte_ejecutivo_2014_s_m_el_brocal_web.pdf
- <http://es.scribd.com/doc/131316771/Nivel-Isoceraunico-en-El-Peru#scribd>
- <http://www.osinergminorienta.gob.pe/web/rcc/mapasein>